

TRAITÉ D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME BIOCLIMATIQUES

TRAITÉ

Alain Liébard
André De Herde



D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME BIOCLIMATIQUES

Concevoir, édifier et aménager
avec le développement durable



Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable

Connaître les bases

Construire avec le climat

Construire en climats chauds

Construire avec le développement durable

Construire avec l'éclairage naturel et artificiel

Aménagement urbain et
développement durable en Europe

Cet ouvrage a été édité initialement sous la forme d'un guide de l'architecture bioclimatique en 6 tomes portant chacun les titres des 6 chapitres ci-dessus. Les 6 volumes de la collection, parus entre 1996 et 2004, ont été édités dans le cadre du programme Learnet avec l'appui du programme Altener de la Direction générale Énergie et Transports de la Commission européenne et celui de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (France).



COMMISSION
EUROPÉENNE

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Alain Liébard est architecte. Il participe, dès juin 1973, avant le premier choc pétrolier, au congrès “Le soleil au service de l’homme” organisé par l’UNESCO qui réunit à Paris plus de mille chercheurs de tous les pays. Lauréat du concours “Habitat original par la thermique” lancé par le Plan construction, il construit, en 1974 à Blagnac, les premières maisons solaires HLM. Il consacre sa vie professionnelle au développement et à la promotion des énergies renouvelables en défendant leur complémentarité avec les autres énergies. Il prône un scénario de croissance régulière de leur apport dans la consommation énergétique mondiale, qui permettrait d’atténuer les effets de la grande crise énergétique qui s’annonce et d’aider à l’émancipation des populations rurales des pays du Sud. En 1984, il est chercheur invité de l’université de Berkeley en Californie. Il préside l’Observatoire des énergies renouvelables (www.energies-renouvelables.org) depuis 1985 et crée, en 1990, la Fondation Énergies pour le Monde, reconnue d’utilité publique. Directeur de publication de la revue *Systèmes Solaires*, il publie de nombreux ouvrages et enseigne dans le pôle Environnement de l’École d’architecture de Paris la Villette. Alain Liébard est chevalier de l’Ordre national du Mérite.



André De Herde est ingénieur civil architecte. Il est actuellement professeur ordinaire au département Architecture de l’Université catholique de Louvain-la-Neuve. À ce titre, il est responsable de l’ensemble des enseignements en architecture, énergie, climat et développement durable. En 1994, il est l’initiateur et co-responsable du diplôme postgrade européen en architecture et développement durable (MPh degree), en collaboration avec l’École polytechnique fédérale de Lausanne et l’E.A. Toulouse. En 1980, il crée l’équipe de recherche Architecture et Climat (www.climat.arch.ucl.ac.be) : les activités de la cellule se déroulent au sein de l’Agence Internationale de l’Énergie (AIE), de la Commission européenne et des régions belges. A. De Herde est auteur et co-auteur d’une vingtaine d’ouvrages ; il est co-auteur de l’ouvrage *L’éclairage naturel des bâtiments*, lauréat du prix international Roberval 2003 pour l’enseignement supérieur. Il a organisé deux congrès internationaux en 1986 et 1996 ; a été président du comité exécutif “Solar Heating and Cooling Programme” de l’AIE de 1996 à 1998 et président de l’association internationale “Passive and Low Energy Architecture – PLEA” de 1999 à 2004.



Comment concevoir, édifier et aménager le bâtiment et le territoire en n'hypothéquant pas l'avenir de nos enfants ?
Quelles architectures et quels urbanismes seront capables de répondre à nos besoins et à ceux des générations futures ?

En 368 fiches didactiques et plus de 776 pages, le *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* répond à ces questions et à bien d'autres encore. Il propose des réponses concrètes en synthétisant l'état de l'art et des connaissances. Il offre une nouvelle approche conceptuelle assise sur l'examen systématique du "coût global actualisé".

À l'heure des grandes interrogations sur les changements climatiques, les aspirations au développement des populations du Sud, le maintien des niveaux de vie des populations du Nord, cet ouvrage veut partager avec tous les acteurs de la construction, de l'aménagement et du développement, qu'ils soient professionnels, étudiants, enseignants ou élus locaux et nationaux, les fruits d'un savoir concret et opérationnel.

Le grand public trouvera également dans ce livre les informations et les sources d'inspiration pour construire sa propre maison individuelle bioclimatique, en accord avec ses convictions environnementales.



Éditeur

Observ'ER

Observatoire des énergies renouvelables

146, rue de l'Université

75007 Paris

Tél. : 01 44 18 00 80

Fax : 01 44 18 00 36

www.energies-renouvelables.org

E-mail : observ.er@energies-renouvelables.org

Achévé d'imprimer sur les presses de l'Imprimerie Moderne de l'Est
25 110 Baume-les-Dames – décembre 2005

© **Observ'ER 2 005**

À Léa-Linh, Hélène, David et Violaine Liébard

En l'espace d'un siècle, la population mondiale a été multipliée par six. Le nombre de ruraux est resté relativement stable, alors que la totalité de l'accroissement s'est concentrée dans des villes de plus en plus tentaculaires. Cette urbanisation des sols détermine des modes de vie, de production et de consommation spécifiques.

Les légitimes exigences du plus grand nombre, en matière de confort et de santé, entraînent d'ores et déjà des niveaux de besoins en énergies et en matières premières, incompatibles avec le développement durable. Il faudrait "plusieurs Terre" pour assurer le bien-être d'une population toujours plus nombreuse.

Comment concevoir, édifier et aménager le bâtiment et le territoire en n'hypothéquant pas l'avenir de nos enfants ? Quelles architectures et quels urbanismes seront capables de répondre à nos besoins **ET** à ceux des générations futures ?

Le *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* répond à ces questions et propose des réponses concrètes en synthétisant l'état de l'art et des connaissances. Il offre une nouvelle approche conceptuelle assise sur l'examen systématique du "coût global actualisé".

En effet, sur un plan économique, le coût de la construction du bâtiment ou de l'aménagement n'est pas le seul à devoir être pris en compte au moment des choix. Ceux des études, du maintien des ambiances thermiques, de l'entretien et de la maintenance, des adaptations, des réhabilitations et, en fin de vie de l'ouvrage, ceux de la déconstruction, de la remise en état du site et de l'estimation des externalités sont également à prendre en considération. Le coût global actualisé pour la collectivité – qui a l'obligation de le supporter – correspond à la somme de ces dépenses, estimées et intégrées sur la durée de vie de l'ouvrage. Cette approche doit désormais être au centre des arbitrages et de la hiérarchisation des choix du Projet d'architecture et du Projet urbain. La comparaison objective de plusieurs hypothèses permet ainsi de choisir des solutions plus "amicales avec l'environnement", d'apparence plus chères à l'investissement, mais qui se révéleront, au final, plus économiques et plus viables sur la durée. Rappelons que : « *Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants.* »

Les 368 fiches didactiques de cet ouvrage constituent la trame de notre enseignement et les fondamentaux de notre pratique professionnelle. À l'heure des grandes interrogations sur les changements climatiques, les aspirations au développement des populations du Sud, le maintien des niveaux de vie des populations du Nord, nous voulons partager avec tous les acteurs de la construction, de l'aménagement et du développement, qu'ils soient professionnels, étudiants, enseignants ou élus locaux et nationaux, le fruit d'un savoir concret et opérationnel.

Mis en pratique à une échelle globale, ces savoirs offrent une gamme complète de solutions appropriées aux différents contextes locaux et permettent d'évoluer vers des pratiques professionnelles soutenables, respectueuses de l'environnement.

Alain Liébard, architecte

Président de l'Observatoire des Énergies Renouvelables
Enseignant à l'école d'architecture de Paris la Villette.

André De Herde, ingénieur architecte

Professeur de l'Université catholique de Louvain-la-Neuve
Directeur de la cellule de recherche Architecture et Climat.

Il était naturel pour Gaz de France de soutenir ce remarquable ouvrage de référence qu'est le *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* pour, au moins, deux raisons essentielles. La première est que la conception bioclimatique, qui vise à concilier sobriété énergétique et confort des occupants, illustre particulièrement bien l'engagement développement durable de Gaz de France dans le domaine des bâtiments. La seconde trouve son origine dans un partenariat fructueux qui s'est développé entre Observ'ER et Gaz de France, dès la création de l'Observatoire en 1980. L'Observatoire des énergies renouvelables, dont Gaz de France est un des membres fondateurs, a pour mission de promouvoir le développement des énergies renouvelables à partir d'approches économiques et environnementales. Retenons, pour illustrer ce partenariat Observ'ER-Gaz de France, parmi toutes les coopérations qui ont été engagées depuis 25 ans, deux actions importantes :

- **Le concours "Habitat Solaire Habitat d'Aujourd'hui"**, dont Gaz de France est l'un des partenaires et qui constitue l'un des nombreux moyens dont s'est doté Observ'ER pour populariser une architecture respectueuse de l'environnement. Valorisant l'architecture bioclimatique, cette manifestation fête sa dixième édition. Au cours des différentes sessions, deux Grand Prix du Jury ont récompensé des opérations solaire-gaz naturel :

- la résidence "Les Argilliers" à Pontarlier (Doubs), HLM de 14 logements, intégrant des capteurs solaires en toiture ;
- la maison Daurel à Bordeaux, une "maison solaire idéale" (Plancher Solaire Direct® couplé à une chaudière gaz basse température en appoint gaz naturel).

- **La coédition d'ouvrages** : citons *Le biogaz et sa valorisation* ainsi que *Le biogaz en 20 questions/réponses* et, plus récemment, l'ouvrage *Installations solaires thermiques*, très apprécié des ingénieurs thermiciens.

La parution du *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, que vous avez entre les mains, est la dernière production d'Observ'ER.

Il s'agit là d'un véritable ouvrage de référence sur l'architecture bioclimatique, traitant de l'ensemble des questions concernant aussi bien les bâtiments que l'aménagement urbain.

Gaz de France remercie les auteurs, Alain Liébard et André De Herde, d'avoir été invité à la rédaction de cet ouvrage, au même titre que les autres acteurs de la construction et de l'aménagement, et d'avoir pu ainsi partager leurs connaissances à la fois théoriques et opérationnelles.

Soutenant depuis plusieurs années déjà l'approche bioclimatique, Gaz de France est particulièrement heureux de participer à cette promotion des bonnes pratiques architecturales qui répondent concrètement aux exigences du développement durable.

Patrick Arnaud

Directeur du programme
Bâtiment Développement Durable



I. Gaz de France concilie son ambition industrielle avec l'exercice de ses responsabilités économiques, sociales et environnementales

Gaz de France a inscrit le développement durable au cœur de sa stratégie et de son projet industriel et social, comme partie intégrante de son identité. Le développement durable constitue pour Gaz de France une expression renouvelée de sa culture et de ses valeurs liées à ses missions de service public.

Contexte général

Sur le plan européen, le secteur énergétique se caractérise par une profonde mutation du cadre réglementaire et concurrentiel, ainsi que par une progression soutenue du marché du gaz naturel, appelé à jouer dans les années à venir un rôle croissant, notamment pour la production d'électricité. L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, la promulgation de diverses lois et directives européennes visant à limiter les consommations énergétiques et leurs effets sur l'environnement donnent ainsi toute sa légitimité au développement durable.

Le développement durable, c'est une dynamique de croissance dont la force est de lier ensemble les trois dimensions constitutives d'un progrès qui s'exerce réellement au bénéfice de tous :

- **la dimension économique**, puisque la création de richesses est la condition de l'amélioration continue de nos conditions de vie ;
- **la dimension sociale**, puisque cette croissance n'a de sens que si elle est mise au service d'une vision largement partagée de l'homme et de la société ;
- **la dimension environnementale**, afin de ne pas compromettre la qualité de vie et l'accès aux ressources des générations à venir.

Fournisseur de référence de gaz naturel en France et premier groupe gazier européen par son réseau de transport, Gaz de France se développe sur de nouveaux marchés, avec l'ambition d'être un énergéticien intégré à dominante gazière parmi les leaders sur le marché européen.

Dans ce contexte, Gaz de France cherche en permanence à concilier au mieux son exigence industrielle avec l'exercice de ses responsabilités économiques, sociales et environnementales, dans un contexte concurrentiel accru. Cette constante recherche constitue une condition fondamentale de sa réussite actuelle et future.

Les enjeux de Gaz de France en termes de développement durable

Depuis sa création, Gaz de France a toujours conjugué le développement commercial d'une énergie en concurrence et l'exercice de missions de service public. L'ouverture des marchés introduit un certain nombre de changements pour le Groupe. Pour autant, son projet industriel continuera à intégrer son engagement au service de l'intérêt général : garantie de la sécurité d'approvisionnement, protection de l'environnement, amélioration de la sécurité des clients et des tiers,

actions en faveur de l'intégration sociale, valorisation des territoires et une satisfaction toujours améliorée de la clientèle.

L'ensemble des enjeux économiques, environnementaux et sociaux auxquels Gaz de France est confronté, en tant qu'énergéticien et entreprise de réseaux intervenant au plus près des collectivités locales ont été identifiés, dans le contexte d'une forte montée en puissance du gaz naturel d'ici 2030. Désireux de poursuivre son développement sur le secteur de l'énergie en Europe, tout en conciliant cet objectif avec les exigences de développement durable, Gaz de France entend relever les enjeux multiples auxquels il est confronté. Ces défis seront relevés en assumant les choix opérés, de l'exploration-production de gaz naturel jusqu'à la fourniture de produits et de services énergétiques, en se développant sur tous les métiers de la chaîne gazière.

QUELQUES ENJEUX MAJEURS

En termes d'environnement :

- Lutter contre l'effet de serre
- Préserver les ressources et maîtriser la consommation d'énergie

Pour le groupe :

- Garantir la compétitivité du groupe en marché ouvert et concurrentiel
- Conforter la dimension intégrée du groupe (infrastructures et fourniture d'énergie)
- Maîtriser les risques, la sécurité des approvisionnements et améliorer la qualité des prestations
- Développer l'ancrage territorial
- Respecter l'Agenda 21 (guide de mise en œuvre du développement durable pour le XXI^e siècle)
- Intégrer les fournisseurs dans les politiques Groupe (achats, sécurité, etc.)

En termes de commercialisation, négoce et services :

- Concilier le développement des ventes de gaz naturel et services associés avec le respect d'une utilisation rationnelle de l'énergie
- Maîtriser les risques et améliorer la qualité des prestations
- Élaborer des offres pour les clients les plus démunis
- Faire bénéficier les clients du savoir-faire du groupe en matière d'utilisation rationnelle de l'énergie

Les choix opérés pour relever les défis

Le cœur de la problématique des défis à relever vise la conciliation des performances basées sur la production, la fourniture et la consommation d'énergie avec le respect de l'environnement, l'exercice des responsabilités sociales et environnementales du groupe, dans le cadre de l'ouverture des marchés énergétiques.

Par son projet industriel et social, ainsi que sa démarche de développement durable, Gaz de France a opéré des choix.

Le Groupe s'est ainsi donné pour but, d'une part, de renforcer dans ses offres

les dispositifs de maîtrise de la demande d'énergie et d'efficacité énergétique et, d'autre part, de transformer les contraintes environnementales et législatives en opportunités de création de nouveaux services.

Il s'agit également pour Gaz de France de se positionner comme producteur et fournisseur d'électricité dans le respect de l'environnement et de saisir les opportunités d'acquisition de différents moyens de production d'électricité, en privilégiant la production à partir de cogénérations et de cycles combinés au gaz naturel.

LES RÉPONSES DE GAZ DE FRANCE

Parmi les réponses de Gaz de France aux attentes de ses partenaires et des parties prenantes dans le développement durable :

- le programme de recherche 2005-2007
- la réduction des impacts locaux (paysages, bruits, etc.)
- la convention avec la FNTP pour la réduction des déchets de chantier
- la réhabilitation des sites des anciennes usines à gaz
- la résorption des fontes grises
- la démarche qualité-sécurité-environnement
- les partenariats avec l'Ademe et WWF France
- l'engagement auprès de l'AERES

Le plan d'action mis en œuvre par Gaz de France pour faire face aux enjeux

Pour s'inscrire dans une démarche de développement durable, Gaz de France utilise trois principaux leviers qui consistent à accélérer la maîtrise de l'énergie, innover dans la lutte contre l'effet de serre et étudier les scénarios énergétiques de demain. Dans le cadre de sa démarche de développement durable, le Groupe Gaz de France a su tisser des partenariats nombreux, marques et témoignages de son implication profonde : adhésion au Fonds Prototype Carbone, au Pacte mondial et au WBCSD, partenariat avec le WWF France, accord avec l'Ademe et avec Transparency International, sans compter de nombreux engagements éthiques et environnementaux. Pour apporter des réponses concrètes à tous les enjeux définis, Gaz de France a également initié en 2000 une démarche d'Agenda 21. Celle-ci a conduit à la définition de la politique de développement durable et à un Plan d'Actions Développement Durable – PADD 2004-2006.

Les 5 axes de ce Plan sont les suivants :

1. *Répondre aux enjeux énergétiques par l'innovation et la dynamisation de l'offre de produits et de services ;*
2. *Exercer pleinement sa responsabilité envers ses différentes parties prenantes ;*
3. *Assurer la croissance du Groupe sur le marché européen ;*
4. *Construire un socle ressources humaines et social de Groupe pour relever ses enjeux industriels ;*
5. *Prendre une part active au développement des territoires.*

Ce plan d'actions est associé à des engagements de progrès concrets et mesurables car la prise en compte des exigences de développement durable constitue un facteur de croissance pour Gaz de France. Elle permet, par exemple, de renforcer l'acceptation des réseaux et des installations industrielles auprès des territoires, par la concer-

tation et le maintien d'un haut niveau de sécurité et de respect de l'environnement. Elle permet également de fidéliser les clients et d'en conquérir de nouveaux en intégrant des critères de développement durable dès la conception des offres du Groupe.

Ainsi, Gaz de France aide au développement des mécanismes incitatifs d'économie d'énergie et encourage les solutions performantes telles que les chaudières à condensation, les systèmes de cogénération ou le recours au gaz naturel comme carburant propre pour les transports.

Le Groupe soutient activement le dispositif des certificats d'économie d'énergie, présent dans la loi de programme (du 13 juillet 2005) fixant les orientations de la politique énergétique.

Enfin, toutes les offres de Gaz de France intègrent les enjeux liés à l'efficacité énergétique.

QUELQUES PARTENAIRES CLÉS : L'ADEME ET WWF FRANCE

Les partenariats développés avec l'Ademe et le WWF France ont pour objectifs communs la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, ainsi que la sensibilisation des consommateurs au thème de la sobriété énergétique.

L'Ademe et Gaz de France ont signé le 25 juin 2004 un nouvel accord-cadre triennal décliné autour des axes de coopération suivants :

- le renforcement de l'efficacité énergétique et de la lutte contre l'effet de serre ;
- le développement des énergies renouvelables par des solutions économiquement viables, couplant gaz naturel et énergies renouvelables ;
- la contribution aux transports propres, par l'utilisation de véhicules au gaz naturel ;
- la valorisation des déchets ;
- l'aide à la recherche, notamment par le lancement de nouvelles fondations ;
- la mise en œuvre d'actions spécifiques de maîtrise de l'énergie à l'égard des foyers en situation de précarité ;
- la coopération à des programmes européens ou à des opérations internationales de lutte contre le changement climatique.

WWF France et Gaz de France se sont engagés en octobre 2003 dans un partenariat destiné à mettre en œuvre une utilisation responsable des énergies autour de 3 objectifs :

- lutter contre le réchauffement climatique ;
- réduire davantage l'empreinte écologique du Groupe ;
- sensibiliser à une utilisation raisonnée de l'énergie.

Ce partenariat s'appuie sur trois convictions majeures, partagées :

- l'énergie la plus propre est celle qui n'est pas consommée ;
- le gaz naturel est une énergie de transition qui présente un des meilleurs compromis énergétiques au regard du développement durable ;
- la recherche en faveur de nouvelles énergies et l'utilisation des énergies renouvelables doivent être développées dès aujourd'hui.

LA R&D CONDUIT À DES BÂTIMENTS ÉCONOMES EN ÉNERGIE

Le premier axe développé dans le PADD (Plan d'Actions Développement Durable) est de répondre aux enjeux énergétiques par l'innovation et la dynamisation de l'offre de produits et de services. Ceci signifie concrètement de :

- promouvoir la maîtrise de la consommation d'énergie en accompagnant les clients dans la recherche des solutions les mieux adaptées ;
- encourager le développement de nouvelles solutions énergétiques et d'usages performants du gaz naturel (comme la cogénération, le gaz naturel pour véhicules) ;
- s'impliquer activement dans la lutte contre l'effet de serre.

Depuis 1993 en effet, Gaz de France déploie son action autour de 3 objectifs principaux :

- réduire ses émissions directes de GES ;
- intégrer dans ses offres les exigences d'efficacité énergétique et de développement des énergies renouvelables ;
- investir sur l'innovation et développer la recherche et la mise en œuvre de techniques innovantes.

Le programme d'actions de R&D pour 2005-2007 s'articule autour de 4 axes :

- réduire davantage les impacts environnementaux liés à l'activité gazière (stockage, compression, distribution, etc.) ;
- renforcer la sécurité des équipements y compris ceux des clients (ouvrages et installations) ;
- imaginer des solutions énergétiques de long terme ;
- développer l'utilisation rationnelle de l'énergie pour les logements, ainsi que dans l'industrie (par exemple *via* la cogénération ou le gaz naturel carburant).

Disposant de l'un des centres de recherche gazière les plus importants en Europe, Gaz de France cible ses programmes de recherche sur des scénarios énergétiques prospectifs et des dispositifs renforcés d'efficacité énergétique et de sécurité. Ils doivent lui permettre de construire, à court terme, de nouveaux avantages concurrentiels et, à long terme, de relever les enjeux énergétiques de demain.

Le développement de technologies innovantes moins consommatrices d'énergie, notamment dans les secteurs du bâtiment et des transports, représente une orientation de recherche majeure.

Les travaux portent essentiellement sur :

- les nouveaux vecteurs énergétiques tels que l'hydrogène ;
- les convertisseurs d'énergie, comme les piles à combustible ;
- l'amélioration des procédés de traitement des gaz à effet de serre (capture et séquestration du gaz carbonique) ;
- les énergies renouvelables ;
- les dispositifs d'efficacité énergétique, en partenariat avec les filières du gaz naturel et de la construction.

**GAZ DE FRANCE PRÉPARE LE LONG TERME AU SEIN DE
LA FONDATION “BÂTIMENT-ÉNERGIE”**

Gaz de France et trois industriels majeurs – Arcelor, Lafarge, et EDF – ont décidé de s’associer à l’initiative de l’Ademe et du CSTB afin de créer la Fondation “Bâtiment-Énergie”.

Cette Fondation est destinée à financer des recherches qui permettront de concevoir des bâtiments consommant à l’horizon 2050, trois à quatre fois moins d’énergie qu’aujourd’hui.

Les progrès escomptés doivent bénéficier aux bâtiments neufs mais également au patrimoine existant, cible essentielle d’une politique efficace de maîtrise de l’énergie.

II. Le développement durable : une exigence dans toutes les offres de Gaz de France

Même si le défi paraît, en première approche, paradoxal, il est tout à fait possible de concilier vente de gaz naturel avec économies d'énergie. Gaz de France choisit en effet de s'investir en faveur de l'efficacité énergétique et de la maîtrise de la demande d'énergie, convaincu de l'urgence à agir et des opportunités de développement liées à ces enjeux. Il s'agit notamment d'inciter les consommateurs à maîtriser leurs consommations et à choisir des techniques émettant moins de gaz à effet de serre.

En marché ouvert depuis le 1^{er} juillet 2004, pour les PME-PMI, les professionnels et les collectivités territoriales, l'enjeu concurrentiel ne porte plus uniquement sur le choix de l'énergie (gaz, électricité ou fioul) mais aussi sur le choix du fournisseur. Les clients du marché éligible bénéficient d'une relation commerciale adaptée à leurs besoins : construction d'offres sur mesure, élaboration de solutions globales, conseillers spécialisés au téléphone, commercialisation *via* les installateurs partenaires, nouveau site internet : www.gazdefrance.fr, etc. Ainsi, en 2004, les actions commerciales de Gaz de France se sont concrétisées sur tous ses marchés, avec notamment près de 237 000 nouveaux clients chauffage. Avec une offre commerciale multiservice et multi-énergie structurée autour de marques adaptées à chacun de ses clients, Gaz de France se positionne comme le fournisseur d'énergie de référence et accompagne ses clients dans la maîtrise de leurs consommations énergétiques. De nouveaux outils – diagnostics énergétiques et nouvelles prestations de conseils et de services – visant à optimiser les performances, sont ainsi proposés aux clients dans cette perspective.

Pour fidéliser ses clients en gaz naturel et en conquérir de nouveaux, Gaz de France a donc diversifié ses offres énergétiques, développé des programmes relationnels personnalisés et conduit une stratégie de développement soutenue par la création de marques commerciales ciblées :

Pour les particuliers : DolceVita®

Cette marque fait référence aux équipements les plus performants, tels que les chaudières à basse température et à condensation, ainsi qu'aux systèmes combinant les énergies renouvelables au gaz naturel (comme le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire par système associant solaire thermique et gaz naturel). Créée à l'attention des maîtres d'ouvrage et des clients particuliers, DolceVita® s'inscrit sur le territoire du confort de vie chez soi et propose de répondre à toutes les attentes individuelles de confort, tant en termes de performance, de modernité et d'économie que de respect de l'environnement. En parallèle, des partenariats spécifiques ont été élaborés avec les constructeurs de maisons individuelles et avec les installateurs.

Pour les collectivités territoriales : Énergies Communes®

Cette gamme d'offres propose aux collectivités territoriales des solutions à forte valeur ajoutée qui permettent d'accompagner les maîtres d'ouvrage publics dans leurs choix énergétiques et environnementaux. Énergéticien intervenant au plus près des territoires, Gaz de France s'attache, depuis de nombreuses années, à accompagner les collectivités dans leur développement. Ses trois domaines d'in-

tervention légitimes (développement des réseaux et de l'accès au gaz naturel, mise à disposition d'offres et d'expertises énergétiques de référence, actions de solidarité et de développement économique local) sont autant de leviers pour contribuer aux défis qui s'imposent aux collectivités territoriales.

Pour prendre une part active au développement des territoires, le Groupe vise à :

- Concilier rentabilité économique et accès à l'énergie. À la différence des biens de première nécessité tels que l'eau et l'électricité, le gaz naturel n'est pas soumis à une obligation légale de desserte. Le développement des réseaux de gaz naturel, outil d'aménagement des territoires, doit répondre à une rentabilité minimale fixée de façon contractuelle avec l'État et les collectivités locales. Les plans de desserte sont décidés en concertation avec les collectivités, propriétaires des réseaux. Gaz de France a déployé de nombreux efforts pour étendre la zone de desserte. Aujourd'hui, près de 9 000 communes, soit environ 76 % de la population française, sont desservies en gaz naturel.
- Contribuer à l'amélioration de la qualité de vie en ville par des offres de référence : Pour les collectivités, l'énergie constitue un levier de développement, mais aussi un facteur d'impacts. Au-delà des qualités intrinsèques du gaz naturel, la politique de Gaz de France consiste à les aider à trouver le meilleur équilibre entre consommation d'énergie et respect de l'environnement, dans le cadre de l'accompagnement des démarches d'Agenda 21. Des solutions intégrées leurs sont proposées. Les offres Énergies Communes® (efficacité énergétique, audit, solutions pour démarches HQE®, etc.) ou le développement du carburant gaz naturel pour les flottes de bus et de véhicules propres contribuent à mieux maîtriser les consommations d'énergie et à limiter les impacts environnementaux. Énergies Communes® propose une large palette d'outils de diagnostics et d'optimisations énergétiques (le logiciel Energie Territoria, par exemple), des solutions couplées avec des énergies renouvelables ou encore l'utilisation du gaz naturel comme carburant (bus, bennes à ordures ménagères), ainsi qu'un accompagnement des collectivités dans leurs projets HQE®.

Pour les professionnels et les entreprises : Provalys®

Avec cette marque, Gaz de France s'adresse aux artisans, commerçants, professions libérales, PME et PMI. Provalys® associe la fourniture de gaz naturel et d'électricité à des services de conseils pour la maîtrise des consommations, l'amélioration de la performance des installations au gaz naturel et le respect des réglementations. Gaz de France met à disposition de ses clients des services techniques allant du diagnostic des installations à l'expertise énergétique chaufferie permettant aux clients professionnels d'évaluer la performance de leur installation au gaz naturel et d'identifier des pistes d'économies, ou encore des offres de réduction des émissions de gaz carbonique adaptées aux spécificités des clients. Provalys® propose des services de gestion pour faciliter la maîtrise et la visibilité des dépenses énergétiques, tels que l'historique des consommations et des facturations ou des formules de prix et des services de financement personnalisés, pour faciliter les décisions d'investissement en matière de rénovation, par exemple.

Pour les grands industriels européens : Gaz de France Energy®

Gaz de France a développé des solutions sur mesure pour optimiser leur outil de production et leurs impacts sur l'environnement. Première marque créée par le Groupe en direction des grands clients européens éligibles dès août 2000, Gaz de France Energy® a poursuivi sa stratégie de conquête d'une clientèle européenne et a accompagné le groupe Gaz de France auprès de ses clients industriels et commerciaux sur leurs sites en Europe. Gaz de France Energy® mobilise toutes les ressources et les expertises du groupe Gaz de France.

Au-delà de l'ensemble de ces marques qui répondent aux attentes et aux spécificités de chacun, Gaz de France continue d'entretenir des relations soutenues avec l'ensemble des acteurs de la filière bâtiment afin de favoriser l'accompagnement et la prescription des offres par les partenaires.

Ainsi les quatre marques commerciales de Gaz de France traduisent les valeurs et les ambitions du Groupe, notamment son engagement en faveur du développement durable.

L'INTÉGRATION DU NOUVEAU DISPOSITIF DES CERTIFICATS D'ÉNERGIES DANS LES OFFRES DE GAZ DE FRANCE

La loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique a prévu la mise en place en 2006 d'un nouveau dispositif visant à inciter les fournisseurs d'énergie à promouvoir les économies d'énergie chez leurs clients. Dans cette perspective, Gaz de France prépare l'intégration de ces nouvelles exigences dans ses offres et services. À cet effet, Gaz de France a d'ores et déjà lancé, en coopération avec l'Ademe, des expérimentations dans deux régions (en Rhône-Alpes à destination des particuliers et dans le Nord-Pas-de-Calais vers une clientèle de professionnels) afin, principalement, d'anticiper ce nouveau dispositif et de tester les modes de production de ces certificats.

III. L'énergie au cœur de la démarche "développement durable" de Gaz de France dans le bâtiment

Gaz de France et la Haute Qualité Environnementale (HQE®)

Depuis le lancement de la démarche HQE® en 1999, le thème de la qualité environnementale s'est étendu au-delà du bâtiment, pour toucher à l'urbanisme, à la qualité des transports ou encore à l'aménagement du territoire. La qualité environnementale est désormais intégrée dans des projets architecturaux très divers, allant de l'habitat individuel en site isolé aux bâtiments collectifs tertiaires.

Gaz de France a toujours œuvré pour préconiser des solutions performantes en énergie. C'est donc avec conviction que le Groupe s'est engagé dans la démarche HQE®. Pour les maîtres d'ouvrage, le solaire est souvent le porte-drapeau d'une politique de développement durable qui revêt une importance croissante vis-à-vis des clients et des actionnaires. Or, des opérations HQE®, intégrant un chauffe-eau solaire, des solutions au gaz naturel et des équipements techniques performants permettent d'améliorer le rendement et de diminuer notablement le coût d'exploitation d'un bâtiment.

La démarche HQE® constitue donc une application concrète de la prise en compte, dans le secteur de la construction, des exigences du développement durable. Elle vise à maîtriser les impacts d'une opération sur l'environnement extérieur tout en assurant, à l'intérieur des bâtiments, des conditions de vie saines et confortables. Loin d'être une simple tendance, il s'agit là d'un mouvement de fond, qui se structure et se normalise dans tous les secteurs (avec la certification opérationnelle notamment pour certains types de bâtiments tertiaires).

Cet enjeu fort a été réaffirmé par les pouvoirs publics puisque selon le Plan Climat, au moins 20 % des bâtiments publics construits devront avoir suivi la démarche HQE® en 2005 et 50 % en 2008.

À travers la démarche HQE®, ce sont des modes nouveaux et différents de conception, de construction et de gestion des bâtiments qui apparaissent. Le souhait de Gaz de France est de faire en sorte que la démarche volontaire qu'est la HQE® soit adoptée par le plus grand nombre et ne cesse de s'amplifier. Cela implique de réinterroger les modes de fonctionnement des professionnels. Gaz de France entend donc accompagner leurs efforts. Le gaz naturel, de ce point de vue, possède des atouts indéniables, notamment sa souplesse et sa disponibilité. Il apparaît, à bien des égards, comme l'énergie de complément idéale des énergies renouvelables et s'avère parfait dans les systèmes combinés, où, par exemple, des capteurs solaires alimentent à la fois un ballon de production d'eau chaude sanitaire et une centrale de distribution sur laquelle sont reliés des planchers chauffants. Mais le gaz naturel demeure une énergie non renouvelable : Gaz de France a la responsabilité de la consacrer aux usages les plus performants. C'est ainsi que son action en faveur du développement durable dans la construction prendra du sens.

LES ACTIONS DE GAZ DE FRANCE DANS LE DOMAINE DE LA HQE® :

- une contribution à la mise en place et à l'évolution des certifications et normalisations dans ce domaine ;
- l'intégration de la Qualité Environnementale dans ses offres :
 - Par la promotion et l'appui au développement de solutions performantes
 - Par la combinaison harmonieuse du gaz naturel et des énergies renouvelables, au sein d'une gamme d'offres adaptées aux aspirations diversifiées de ses clients :

On constate (selon une enquête réalisée en 2002 et 2003 par Gaz de France sur plus de 250 réalisations) qu'une énergie renouvelable est choisie dans environ 25 % des cas avec, comme leader, le solaire thermique (celui-ci, lorsqu'il est utilisé pour la production de l'eau chaude sanitaire est associé 2 fois sur 3 au gaz naturel).
- un accompagnement des maîtres d'ouvrage dans leurs projets (cet appui peut prendre la forme de conseils, d'informations, ou d'expertises relatives aux solutions énergétiques, à leur mise en œuvre et leur maintenance) ;
- l'organisation et le partage de retour d'expériences et la réalisation de bilans détaillés sur des opérations particulières, afin de mieux faire connaître cette démarche vertueuse et l'impact de son application ;
- des communications sur le sujet.

Gaz de France et le solaire thermique

Les systèmes associant solaire et gaz naturel permettent à Gaz de France d'offrir à ses clients une réponse concrète et performante en matière de respect de l'environnement tout en lui assurant un haut niveau de confort. C'est la raison pour laquelle le Groupe souhaite conforter et développer la place de ces systèmes dans ses offres et contribuer ainsi, en concertation étroite avec l'ensemble des partenaires concernés, au développement maîtrisé de ces solutions économes en énergie et respectueuses de l'environnement.

S'appuyant sur son expertise dans le domaine des systèmes associant solaire et gaz naturel sur différents marchés (particuliers, collectivités territoriales, professionnels, etc.), Gaz de France intègre ainsi progressivement ces solutions performantes de couplage "solaire thermique-gaz naturel" dans ses offres commerciales. En habitat individuel, Gaz de France propose pour toute la gamme DolceVita®, la production d'eau chaude sanitaire par un Chauffe-eau solaire individuel (CESI). Avec l'offre DolceVita® Premium en maison individuelle, il est possible d'installer un Système solaire combiné (SSC) qui assure les deux fonctions : chauffage et production d'eau chaude sanitaire, tandis qu'en habitat collectif (neuf et existant), on peut installer un système collectif de production d'ECS-gaz naturel.

Enfin, dans le secteur tertiaire, une offre "solaire-gaz naturel" est également proposée si le bâtiment a d'importants besoins en eau chaude sanitaire à usage continu.

Afin de contribuer à un développement plus ample des solutions couplant solaire thermique et gaz naturel, Gaz de France :

- continue à participer activement au développement maîtrisé des produits techniques, en collaboration avec l'ensemble des partenaires concernés ;
- favorise et appuie le portage de ces solutions par des professionnels compétents et impliqués ;
- intensifie la valorisation des systèmes solaire-gaz naturel auprès du marché, dans le cadre de la communication et de l'information développée sur ses offres commerciales.

Des documentations sur la qualité environnementale des bâtiments et le solaire thermique sont disponibles à CEGIBAT (cf. www.cegibat.fr).

Gaz de France soutient les conceptions bioclimatiques

→ *Des exigences législatives et réglementaires renforcées*

Une évolution majeure du nouveau contexte législatif est issue de la loi de programme (du 13 juillet 2005) fixant les orientations de la politique énergétique. Cette première loi-cadre sur l'énergie depuis 1973 – très ambitieuse – intéresse les producteurs, les consommateurs, les fournisseurs et également l'ensemble des partenaires de la filière.

Rappelons qu'elle fixe quatre objectifs, dont la promotion de l'efficacité énergétique et la lutte contre l'effet de serre. Ainsi, l'intensité énergétique de la France doit être réduite de 2 % à l'horizon 2015.

Pour parvenir à ces objectifs, des outils fiscaux, des incitations aux économies d'énergie et des réglementations pour l'existant, ainsi qu'une évolution de la réglementation thermique des bâtiments neufs seront proposés.

Ainsi, la future réglementation thermique (RT 2005) introduira trois éléments principaux :

- le renforcement de l'isolation thermique ;
- l'amélioration des performances des systèmes de gestion et de production de chaleur ;
- la prise en compte de plus en plus importante du bioclimatique.

Des économies d'énergie substantielles sont attendues par cette voie réglementaire, tant dans l'habitat individuel qu'en habitat collectif. Dans ce contexte, des solutions techniques trouveront toute leur légitimité : comme le solaire thermique couplé au gaz naturel, les chaudières basse température et à condensation, les planchers chauffants.

Par ailleurs, le confort d'été et la conception bioclimatique seront valorisés, comme il se doit dans une démarche de développement durable.

→ *La conception bioclimatique : une réponse de plus en plus pertinente depuis le "choc" de 2003*

La canicule d'août 2003 a en effet remis en avant la notion de confort thermique d'été, mais a également concouru à l'idée qu'une climatisation active de tous les édifices "sensibles" pourrait être la panacée. À cela, s'ajoutait le fort développement de la climatisation active en résidentiel, constaté depuis et qui ne fait que renforcer une tendance déjà observée. Pourtant, compte tenu du climat tempéré de la France, des solutions dites passives peuvent permettre de s'en affranchir. Ainsi, un bâtiment bien conçu permet, généralement, même lors de pics à 40 °C, de ne jamais franchir les 27 °C dans la journée.

Les pouvoirs publics, qui sont soucieux de limiter l'installation de climatisation active, ont donc valorisé plus concrètement la conception bioclimatique dans la future réglementation thermique 2005. Toutefois, l'expérience a montré que la réglementation thermique permet surtout de valoriser des équipements et des matériaux performants, mais qu'elle peine parfois à en faire de même sur les aspects relatifs à la conception architecturale.

En combinant des sources d'énergies renouvelables, comme le solaire thermique, avec de nouveaux matériaux, des équipements performants et des concepts innovants de construction, il devrait être possible de parvenir à des économies considérables. La conception bioclimatique, c'est-à-dire la prise en compte de l'environnement extérieur dans la conception du bâti afin de réduire les besoins de froid et de chaud et de procurer un bon niveau de confort aux occupants, est loin d'être un concept nouveau. Pourtant, des gisements d'économie d'énergie prometteurs existent et ne sont pas encore suffisamment exploités.

Il est probable que la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments constitue une perspective intéressante pour la valorisation et la diffusion de la conception bioclimatique. En effet, cette Directive indique dans son article 5 qu'une étude de faisabilité technique, économique et environnementale sera nécessaire pour tous les bâtiments neufs d'une superficie supérieure à 1 000 m² et qu'il en soit tenu compte avant le début de la construction, avec par exemple :

- les systèmes d'approvisionnement en énergie décentralisés faisant appel aux énergies renouvelables ;
- la production combinée de chauffage et d'électricité ;
- les systèmes de chauffage ou de refroidissement urbains ou collectifs, s'ils existent ;
- les pompes à chaleur, sous certaines conditions.

La conception bioclimatique devrait, dans l'esprit de l'article 5, faire également l'objet d'une étude de faisabilité car ses atouts sont nombreux sur le plan de la réduction des consommations énergétiques et de la préservation de l'environnement.

→ *La conception bioclimatique: un engagement fort de Gaz de France depuis les années 2000*

Gaz de France s'intéresse à la problématique de la conception bioclimatique dans la mesure où celle-ci est totalement cohérente avec sa stratégie de développement durable appliquée aux bâtiments.

À cet effet, le Groupe a élaboré, il y a quelques années, une méthode (basée sur une grille à points, développée en partenariat avec un réseau d'architectes), destinée principalement aux promoteurs immobiliers de maisons individuelles ou d'immeubles résidentiels.

Cette grille permettait ainsi au maître d'ouvrage d'apprécier la qualité des dispositifs architecturaux envisagés en lui fournissant une évaluation chiffrée de leur impact, logement par logement. Plusieurs aspects étaient pris en compte dans cette méthode parmi lesquels : l'orientation du bâtiment, l'aération, la taille et la position des baies du séjour, les protections solaires, l'isolation sous toiture, la réflexion des sols à moins de trois mètres de la maison.

Dans le souci de promouvoir et valoriser ce type de démarche auprès des consommateurs, Gaz de France apportait un accompagnement complémentaire, au travers d'une notice d'utilisation destinée à l'occupant d'un logement doté de dispositifs architecturaux permettant d'améliorer le confort d'été. En effet, mettre en place des solutions dites bioclimatiques ne suffit pas à améliorer le confort d'un logement. Il faut également que l'occupant fasse bon usage de ces dispositifs. Ce guide d'utilisation décrivait donc les gestes simples que doit respecter l'occupant afin de tirer le meilleur parti de son logement bioclimatique. Cette méthode a notamment permis de dresser une liste des bonnes pratiques existantes en terme de conception de bâtiments bioclimatiques. La mise au point de cette méthode s'est en outre concrétisée par l'intégration du bioclimatique dans les offres DolceVita®.

Cette grille à points a constitué une première approche que Gaz de France souhaite aujourd'hui améliorer, compléter et enrichir par la recherche de solutions améliorant le confort d'été sans pour autant augmenter les consommations de chauffage (optimisation été/hiver), par l'étude d'autres solutions bioclimatiques (comme la surventilation nocturne), par l'extension aux bâtiments tertiaires d'hébergement (hôtel, résidence pour personnes âgées ou hôpital) et aux bâtiments existants.

UN NOUVEL OUTIL D'AIDE POUR LES BUREAUX D'ÉTUDES

Dans le cadre de l'appel à propositions Ademe-PUCA "Préparer le bâtiment à l'horizon 2010", Gaz de France a proposé de développer un guide à destination des promoteurs et des équipes d'ingénierie pour la réalisation d'études de faisabilité sur la construction de bâtiments d'hébergement bioclimatiques (neufs ou existants). Cette proposition a été acceptée et s'est traduite par la signature d'une convention entre l'Ademe et Gaz de France. Ce projet est en cours de réalisation, en collaboration avec plusieurs bureaux d'études (TEP2E, Tribu Énergie, Pouget Consultants) et un architecte (Atelier Pascal Gontier). Cet outil sera disponible courant 2006.

- Une telle démarche permet de définir une méthode d'évaluation des conceptions bioclimatiques cohérente avec la nouvelle réglementation thermique 2005, et en adéquation avec les attentes des acteurs de la construction.
- Elle s'inscrit dans une logique générale d'amélioration du confort pour l'occupant, de construction durable et d'économie d'énergie, avec le recours privilégié à des dispositions de rafraîchissement "passifs", plutôt qu'à des systèmes de climatisation active.
- Il s'agit par ailleurs de rechercher un niveau de qualité et de performance ; cela sera donc un moyen pour le client d'apprécier la qualité de sa réalisation.
- Cette démarche doit également valoriser le savoir-faire des concepteurs de logements.

Ces travaux et réflexions sur le bioclimatique seront prochainement intégrés dans les futures offres commerciales de Gaz de France et en particulier dans la gamme d'offres DolceVita®, traduisant ainsi les valeurs de confort, d'économie d'énergie, de respect de l'environnement et de modernité de la marque.

TRAITÉ D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME BIOCLIMATIQUES

Concevoir, édifier et aménager
avec le développement durable

Alain Liébard et André De Herde

Le soleil constitue notre source énergétique fondamentale. Les caractéristiques du système solaire soumettent la terre à des variations saisonnières affectant l'évolution de l'ensoleillement et des températures.

Les saisons sont définies comme des états relativement constants du climat. En zone tempérée, les cycles saisonniers varient en fonction de la position relative de la terre par rapport au soleil (Fig. 2), avec un certain déphasage dû à l'inertie propre de la terre. Le réchauffement de la masse terrestre prenant du temps, les températures moyennes extérieures maximales, sous nos climats tempérés, sont enregistrées environ un mois après que le soleil a atteint sa hauteur angulaire maximale.

Les mouvements de la terre à l'intérieur du système solaire sont très complexes. La rotation terrestre (1 690 km/h au droit de l'équateur) correspond au cycle jour / nuit, tandis que son parcours autour du soleil, équivalent à 1 710 km/min, provoque les variations saisonnières.

L'axe de rotation de la terre est incliné de 23°27' par rapport à l'écliptique (Fig. 1). Cette inclinaison définit les limites des tropiques du Cancer et du Capricorne : au solstice d'hiver en hémisphère Nord (le 22 décembre à 12 h 00 en temps universel), les rayons du soleil sont perpendiculaires au tropique du Capricorne (et perpendiculaires au tropique du Cancer au solstice d'été en hémisphère Nord).

La géométrie du système définit également les cercles polaires. Aux équinoxes, en mars et en septembre, le soleil aura son zénith à l'équateur et, en tout point de la terre, la durée du jour sera égale à la durée de la nuit. La figure 1 illustre la variation de la durée du jour par rapport à la hauteur solaire à midi en temps universel.

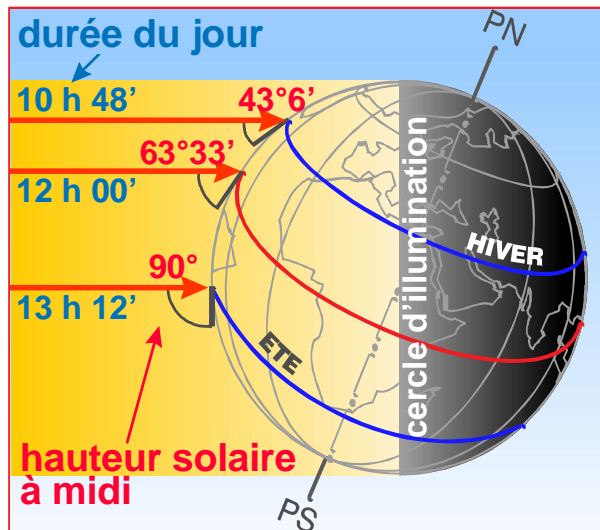
Les phénomènes les plus curieux peuvent s'observer au pôle Nord où, pendant 6 mois, le soleil tourne sur l'horizon jour après jour sans jamais se coucher. Il suit en réalité une spirale en s'élevant graduellement jusqu'à atteindre sa hauteur maximale au solstice d'été. Pendant les 6 autres mois, le pôle est plongé dans l'obscurité.

La translation de la terre autour du soleil dure un peu moins de 365 jours. La terre est accompagnée de son satellite, la lune, dont le mouvement perturbe le champ gravitationnel terre-soleil (phénomène de nutation). Ce n'est donc pas la terre, mais bien le centre de gravité du système terre-lune, qui décrit une orbite légèrement elliptique autour du soleil.

Ces facteurs de perturbation expliquent des phénomènes tels que le léger décalage entre le temps universel et le temps horlogique ou la nécessité des années bissextiles.

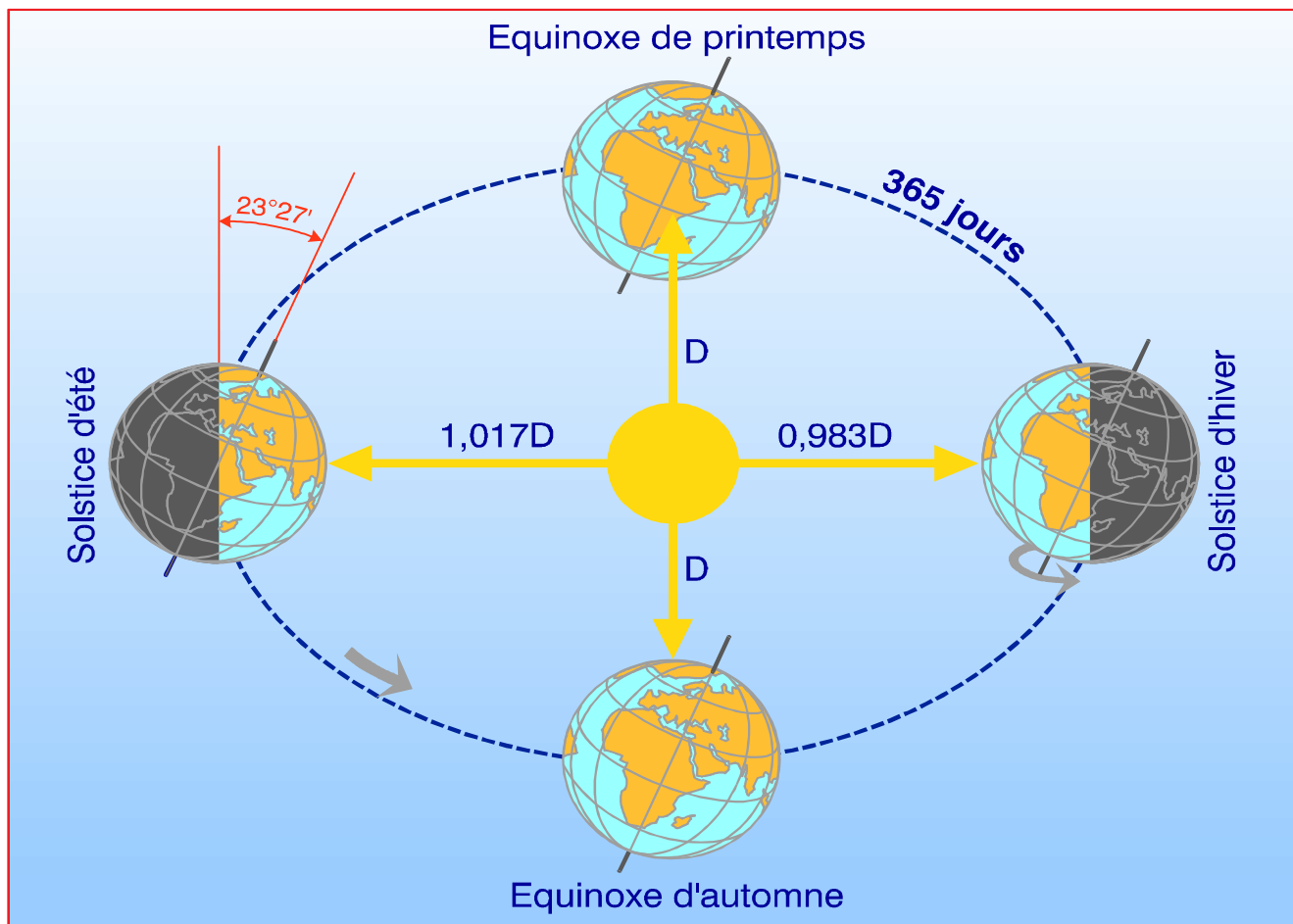
Le couple terre-lune décrit une orbite légèrement elliptique autour du soleil.

L'inclinaison de l'axe de rotation nord-sud de 23°27' par rapport au plan écliptique explique les cycles saisonniers.



Solstice d'hiver en hémisphère Nord : 22 décembre à midi. Durée du jour et hauteur solaire à midi.

1



2 Description simplifiée du plan orbital du système terre-soleil.

Le soleil est un astre incandescent (sa température superficielle est estimée à 5 750 °C) qui émet un rayonnement électromagnétique sous forme de lumière et de chaleur (Fig. 1). Les rayons du soleil sont nécessaires pour entretenir, à la surface de la terre, les conditions de température et de lumière indispensables aux réactions biochimiques de la vie végétale et animale.

La terre n'intercepte qu'environ 2 milliardièmes de l'énergie émise par le soleil. Cette quantité d'énergie équivaut à $\pm 10\,000$ fois la puissance totale installée par l'homme aujourd'hui. A la limite de l'atmosphère, l'intensité du rayonnement est égal à la constante solaire, soit $1\,350\text{ W/m}^2$. Par ciel clair, le rayonnement solaire atteint à midi (temps universel) une puissance de l'ordre de $1\,000\text{ W}$ sur une surface de 1 m^2 perpendiculaire au rayonnement. Pour un site donné, la puissance interceptée par la paroi d'un bâtiment dépend de l'angle d'incidence du rayonnement par rapport à l'orientation et à l'inclinaison de la paroi. Si pour un rayon perpendiculaire à la paroi, la puissance transmise vaut 100, pour un angle d'incidence de 60° , elle vaudra 50 (équivalent à $\cos 60^\circ$) et 0 (équivalent à $\cos 90^\circ$) pour un rayon rasant.

L'énergie solaire est présente partout (énergie "ambiante"), intermittente (cycle journalier et saisonnier), propre (sans déchet) et disponible (pas de tarif, pas d'intermédiaire, pas de réseau). Cependant, elle nécessite des installations pour sa conversion en chaleur ou en électricité.

De l'énergie interceptée par la terre, 60 % sont réfléchis directement par l'atmosphère (Fig. 2) ; 16 % contribuent à l'évaporation des océans, à l'origine du cycle de l'eau et de l'énergie hydraulique ; 11,5 % sont réfléchis à la surface de la terre (selon son coefficient d'albédo), 9,5 % seulement absorbés par la masse terrestre et les masses d'air, et environ 3 % alimentent la photosynthèse (terrestre et aquatique). Une infime partie participe à la formation de réserves d'énergie fossile (0,02 %).

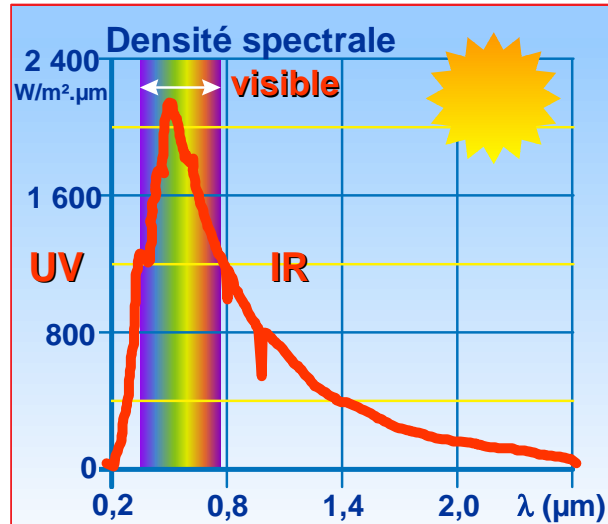
Toutes les régions du monde ne reçoivent pas autant de soleil, les unes que les autres, car entre le soleil et le sol intervient la nébulosité. Par exemple, la Côte d'Azur bénéficie de quelque 2 882 heures de soleil par an, pour 2 038 heures en Vendée et seulement 1 514 heures dans le nord de la France.

L'architecture bioclimatique tente de tirer parti de ces énergies ambiantes disponibles sous forme de lumière et de chaleur : plus de lumière naturelle pour mieux relier l'homme à son environnement et réduire le coût de fonctionnement de l'éclairage artificiel ; plus de chaleur gratuite pour freiner les consommations en énergie marchande et limiter les atteintes à l'environnement.

L'énergie solaire est aujourd'hui utilisée dans le cadre de l'architecture solaire passive (par les baies vitrées, les serres, les chauffe-eau solaires, etc.) et active (capteurs solaires destinés aux systèmes de chauffage). Quant au solaire photovoltaïque, il permet la conversion du rayonnement solaire en électricité (rendement 10 à 12 %) ainsi que certaines applications intéressantes pour les zones isolées ou non reliées au réseau (radio-balisage, phare, télévision ou téléphone solaire, éclairage, pompage de l'eau, réfrigération, etc).

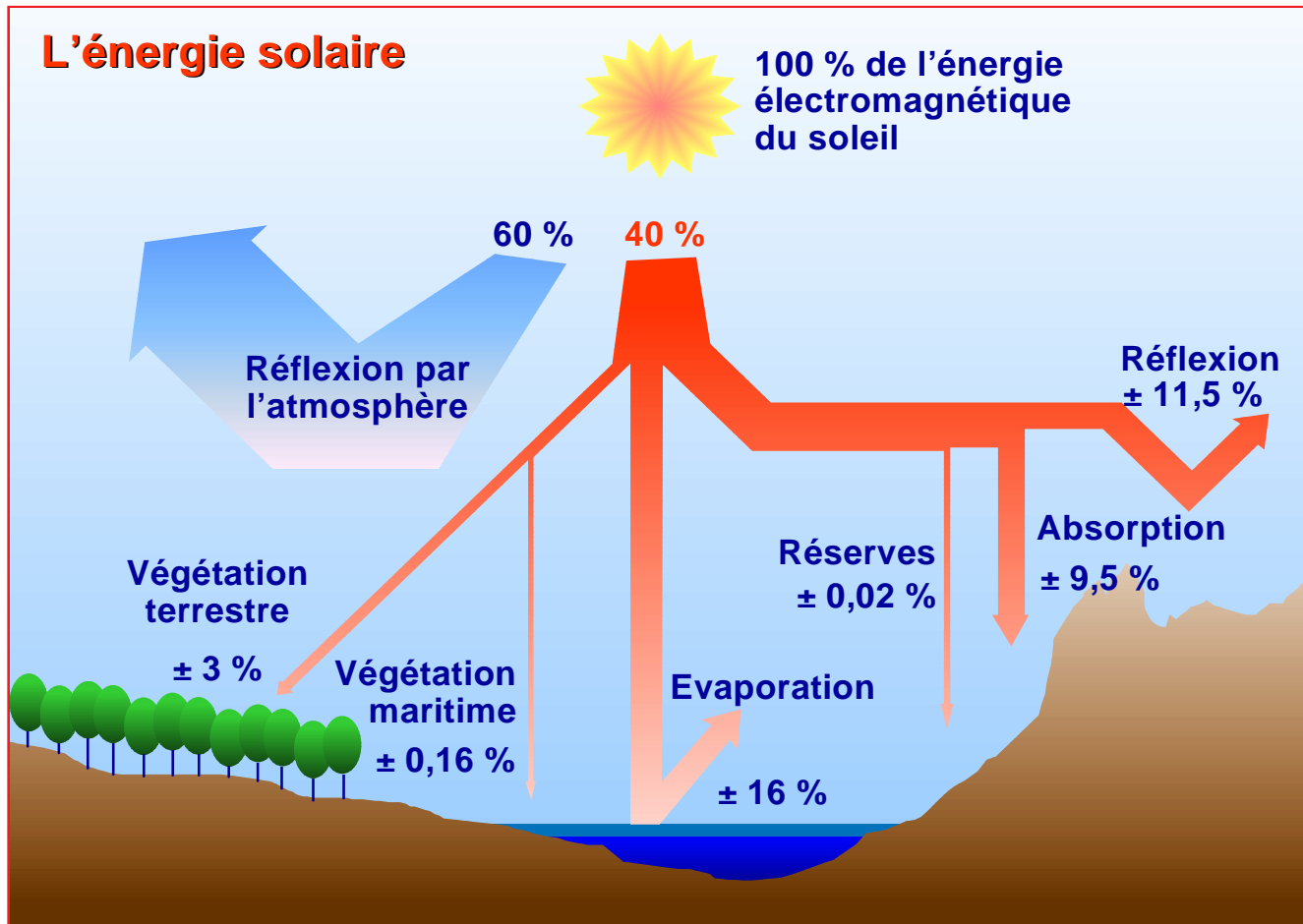
La terre reçoit du soleil plus de 10 000 fois la puissance énergétique totale installée par l'homme aujourd'hui.

L'énergie solaire est intermittente, propre et disponible.



L'énergie solaire est un ensemble d'ondes électromagnétiques. 1

L'énergie solaire



2 Ce que reçoit la terre du soleil.

Le maintien et le développement des activités humaines sur la Terre reposent sur l'existence d'énergies disponibles en abondance et à bon marché. Ces énergies se partagent en énergies renouvelables (ER), dites énergies "flux", et en énergies non renouvelables, dites énergies fossiles ou énergies "stock". La figure 2 présente les principales filières énergétiques actuellement utilisées.

Les énergies renouvelables englobent toutes les énergies inépuisables qui, depuis toujours, nous viennent du soleil, directement sous forme de lumière et de chaleur, ou indirectement par les cycles atmosphériques et la photosynthèse. Le soleil dispense un rayonnement électromagnétique qui constitue notre source lumineuse et thermique.

Les énergies renouvelables sont largement disponibles à la surface de la Terre, et leur emploi permet actuellement d'obtenir des installations à faible et moyenne puissance, appropriée à l'échelle domestique :

- la chaleur peut être captée directement par les fenêtres ou les capteurs solaires et peut également être transformée en énergie électrique grâce aux cellules photovoltaïques ;

- le rayonnement solaire est également à l'origine des mouvements de la masse d'air, lesquels, par différences de température et de pression, produisent l'énergie éolienne ;

- l'énergie hydraulique est alimentée par l'eau, restituée au cycle naturel par les précipitations après évaporation à la surface des océans ;

- la biomasse végétale est le résultat de la transformation par photosynthèse du rayonnement solaire : elle peut être considérée comme une énergie flux (exploitation avec replantation) ou comme une énergie stock (déforestation sans replantation) ;

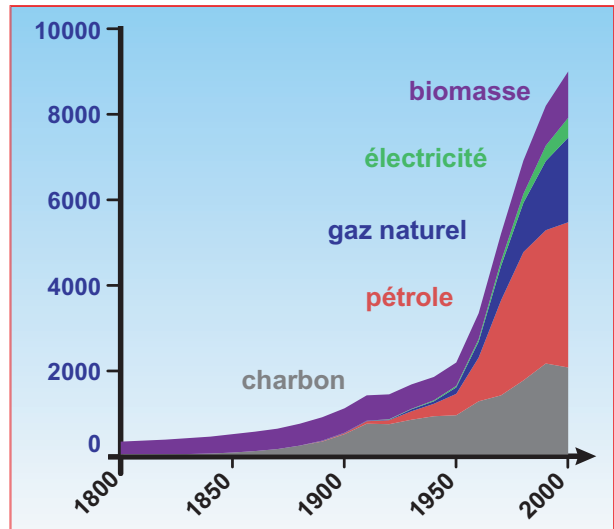
- l'énergie géothermique, chaleur stockée dans la masse terrestre, peut également être exploitée pour, entre autres, le chauffage des édifices (Bassin parisien, Islande, Alaska, etc.).

Par ailleurs, les énergies non renouvelables sont elles-mêmes des sous-produits fossiles végétaux ou animaux de l'énergie solaire (charbon, gaz, pétrole, etc.) ou des gisements naturels (uranium). Ces énergies sont disponibles en quantités limitées, mais leur exploitation permet d'obtenir des installations à haute puissance (centrale thermique ou nucléaire) capables de faire face à des applications industrielles.

La figure 1 rappelle que le développement économique occidental a été rendu possible, dès le XIX^e siècle, par l'exploitation intensive de l'énergie et particulièrement des énergies fossiles, dont la consommation a plus que décuplé en deux siècles : au bois a succédé le charbon, puis le pétrole. Après la crise du pétrole, le nucléaire a gagné de l'importance. Aujourd'hui pourtant, ce mode de développement est mis en cause, tant par l'épuisement ou la raréfaction des réserves d'énergies, que par la pollution produite par la combustion de ces énergies ou le stockage des déchets radioactifs. On estime que les réserves en énergies conventionnelles connues permettront de faire face aux consommations actuelles encore pendant 230 ans pour le charbon, 70 ans pour le gaz, 50 ans pour l'uranium et 40 ans pour le pétrole.

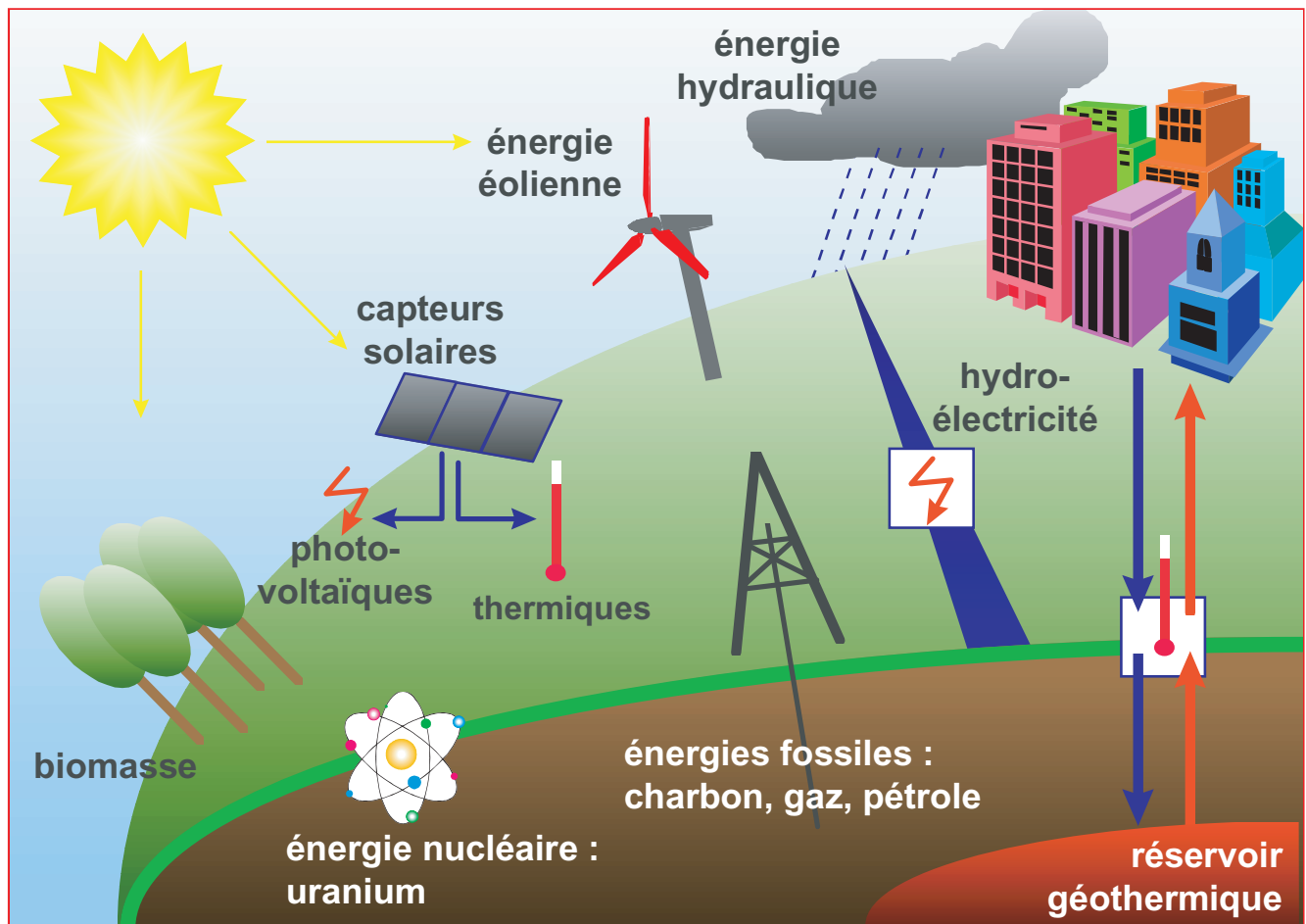
Les différents systèmes énergétiques

Toutes les énergies disponibles sur la Terre proviennent directement ou indirectement du soleil, y compris les énergies fossiles.



Évolution de la consommation mondiale d'énergie depuis le XIX^e siècle (en 10⁹ tep).

1



2 Les différentes sources énergétiques dans le monde sont toutes issues du soleil.

Quand l'espèce humaine ne comptait que 5 à 10 millions d'individus, il y a seulement 10 000 ans, elle ne pouvait guère peser sur son écosystème. Ce n'est que récemment que l'homme a modifié son environnement aussi profondément qu'avait pu le faire la nature, mais en temps beaucoup plus court.

Entre 1750 et 1950, l'Europe a connu une révolution démographique. Grâce au déclin de la mortalité consécutif aux grandes avancées scientifiques (agriculture, santé publique, médecine), la population de l'Europe est passée de 150 à 600 millions d'habitants.

Selon l'Organisation des Nations unies, la Terre comptera 9,3 milliards d'habitants en 2050. 95 % de ces individus supplémentaires naîtront dans les pays les moins développés. Il est prévu que la population d'Europe occidentale diminue tandis que celle d'Amérique du Nord progresse de 40 %. La progression sera plus sensible en Asie (+ 46 %), en Amérique latine (+ 53 %) et surtout en Afrique (+ 146 %) d'ici à 2050. Alors que l'Europe représentait 15,6 % de la population mondiale en 1950, ce chiffre devrait décroître jusqu'à 6 % en 2050. Les pays du Sud compteront, alors, 87 % de la population mondiale, soit environ 8 milliards d'habitants, contre 75 % en 1990 équivalant à 3,8 milliards.

La figure 1 synthétise les tendances démographiques actuelles jusqu'en 2100. La courbe bleue représente l'évolution de la consommation d'énergie primaire depuis 1860. On constate que l'accroissement de la consommation d'énergie se fait à un rythme encore plus soutenu que celui de la population.

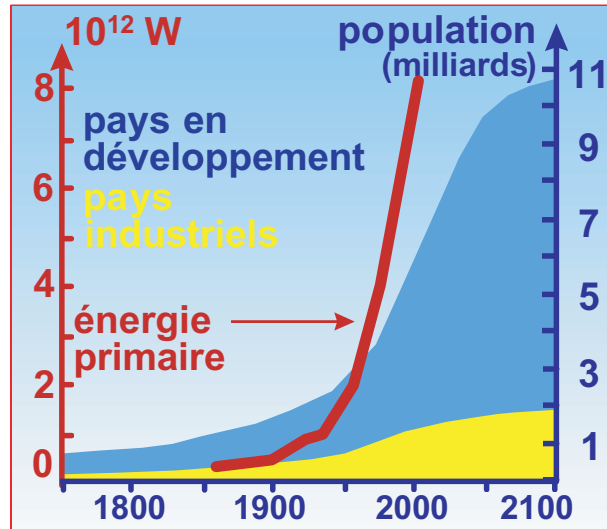
La consommation d'énergie ne correspond pas à la distribution de la population sur la Terre. Les pays industrialisés ne représentent aujourd'hui que 25 % de la population, mais ils consomment 75 % de l'énergie utilisée sur Terre, 60 % du charbon, 73 % du pétrole et 70 % du gaz naturel. La consommation d'énergie par individu dans les pays du Sud est inférieure en moyenne d'un facteur 10 à celle des pays industrialisés. Cette situation est en train de changer puisqu'on enregistre déjà, en 1986, une croissance de la consommation d'énergie égale à 6,2 % par an pour les pays du Sud, contre 0,5 % dans les pays industrialisés.

L'évolution démographique des pays du Sud se conjugue à une plus forte urbanisation. En 2000, 26 % de la population de ces pays vivaient en zone urbaine. En 2025, ce chiffre devrait passer à 75 % en Amérique latine, 42 % en Afrique et 37 % en Asie. Par conséquent, un cinquième des populations urbaines vivra dans des mégalofoles de plus de 4 millions d'habitants.

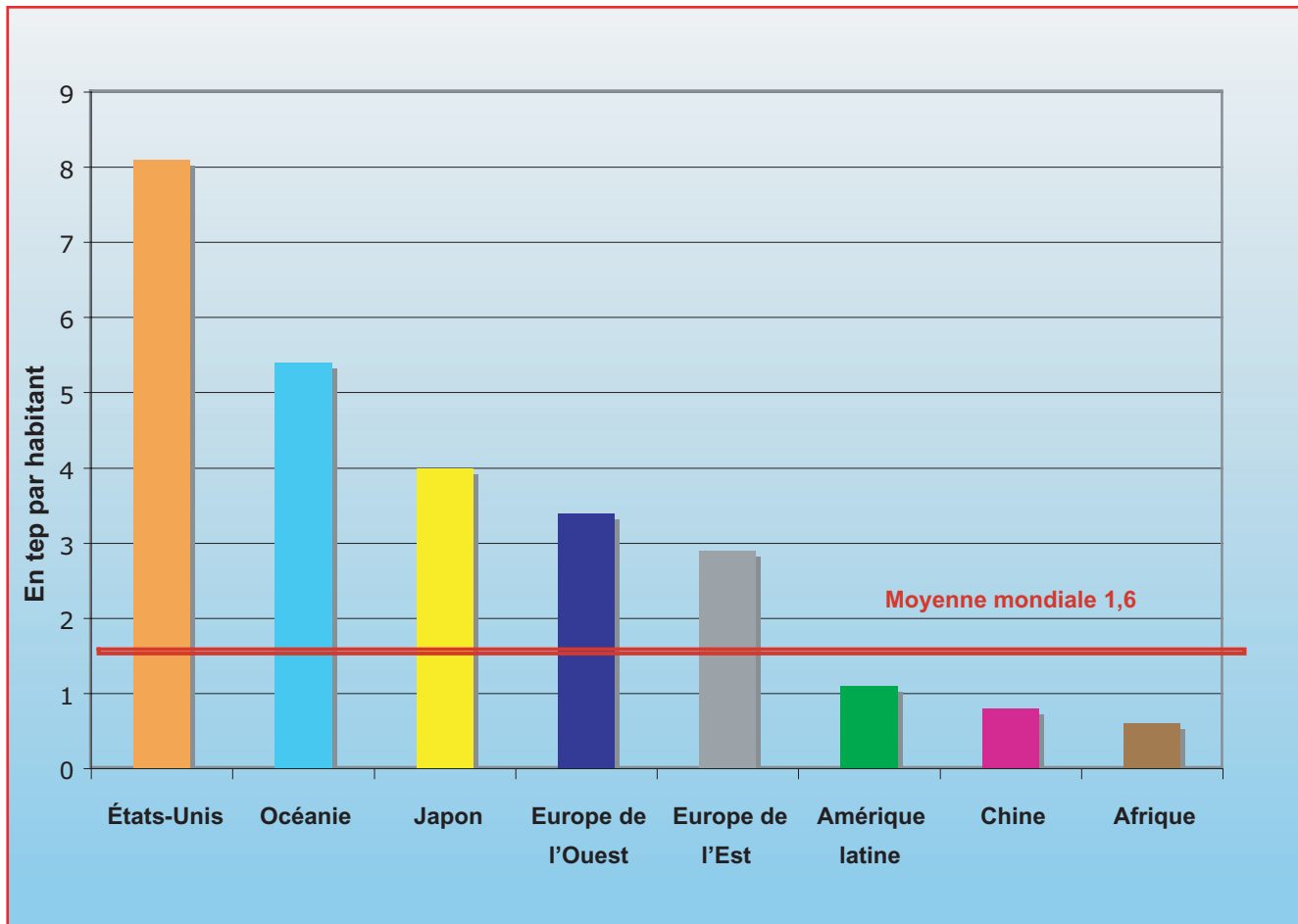
La pression sur l'environnement d'une telle population est énorme : consommation d'eau, alimentation, production et évacuation de déchets, partage des sources d'énergie, etc. Il est déjà possible d'envisager l'ampleur des ravages qui seront provoqués par la pression exercée sur les forêts, les prairies, les cours d'eau et les terres arables et qui entraînent déjà, de nos jours, déforestation, érosion et épuisement des sols, abaissement du niveau des nappes phréatiques, etc.

En 2050, les pays du Sud représenteront plus de 85 % de la population mondiale, contre 75 % en 1990.

Les trois quarts des produits pétroliers sont consommés, aujourd'hui, par les pays industrialisés.



1 Courbes prévisibles de la population mondiale (1750-2100) et consommation d'énergie primaire (1860-1975).



2 Consommation moyenne d'énergie par habitant en 2001 (Source : AIE/OCDE).

Les conséquences écologiques de l'exploitation des énergies fossiles sont aujourd'hui manifestes. C'est dans ce contexte que les Nations unies ont organisé, à Rio en 1992, la Conférence sur l'environnement et le développement, où le principe du développement durable a été reconnu. Il permet de satisfaire les besoins exprimés aujourd'hui, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins.

L'une des caractéristiques de la pollution contemporaine est qu'elle ne connaît pas de frontière. Les dépôts acides attaquent les sols, cultures et forêts à des centaines de kilomètres du lieu où les polluants sont émis. De manière générale, la pollution de l'air (rejets de combustion, rejets industriels) se déplace sur de grandes distances et se diffuse sur de larges territoires.

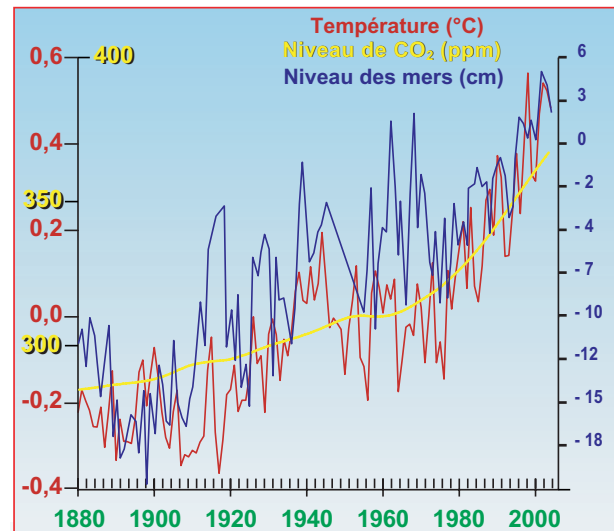
La figure 2 donne quelques illustrations des causes et effets du réchauffement dû aux gaz à effet de serre : 1. Déforestation (forêt amazonienne). 2. Assèchement des sols (Burkina-Faso). 3. Débâcle glaciaire (pôle Sud). 4. Pollution atmosphérique dans les grands centres urbains (Cubatão au Brésil).

Les émissions de gaz carbonique (CO₂), produites par oxydation du carbone dans la combustion du gaz, du charbon, du bois et du pétrole, sont liées à la consommation d'énergie. Les quantités émises depuis quelques dizaines d'années sont très élevées (24 milliards de tonnes dues aux énergies fossiles sur un total de 30 milliards de tonnes émises) et dépassent les capacités naturelles d'assimilation. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit une augmentation de 60 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie d'ici à 2030. Des modifications climatiques majeures sont à craindre car le CO₂ favorise l'effet de serre et le réchauffement de la planète. La figure 1 illustre la corrélation entre l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air (en ppm, à droite), du niveau des mers (en cm, à droite) et des températures par rapport à la température moyenne de référence entre 1950 et 1979 (axe de gauche).

L'hypothèse d'un réchauffement global de la planète par effet de serre remonte déjà aux travaux d'Arrhenius (1895). Aujourd'hui, on estime que la température moyenne du globe pourrait augmenter, d'ici à 2100, de 1,4 °C à 5,8 °C, ce qui se traduirait aussi par une élévation du niveau des mers de 10 à 80 cm. On enregistre déjà un recul généralisé des glaciers et une hausse de 15 cm en un siècle du niveau des mers. Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes est possible ; la canicule en France (2003) et l'ouragan Katrina (2005) en sont peut-être des manifestations. Cette hausse des températures pourrait engendrer des inondations ayant un effet ravageur sur les zones sensibles telles que les deltas fertiles du Nil, du Gange, du Mékong ou du fleuve Niger. Elle pourrait également détériorer la qualité des sols (désertification, salinisation) et multiplier les épidémies infectieuses sensibles à de minimes écarts de températures.

Pour pallier une partie de ces problèmes, les énergies renouvelables constituent, avec l'utilisation rationnelle de l'énergie, un élément important d'une politique énergétique durable qui vise la réduction des émissions de CO₂, un objectif auquel a souscrit l'Union européenne.

Les émissions massives de produits de combustion provoquent des déséquilibres écologiques et climatiques considérables : réchauffement de la planète, modification des précipitations.



Évolution des variations de température et du niveau des mers autour des niveaux moyens, évolution des rejets de CO₂. (Sources : Nasa, Shom, CNRS-CERFACS)

1



1 2
4 3



2 Causes et effets du réchauffement dû aux gaz à effet de serre.

Les grands centres urbains ont vu leur microclimat se modifier au rythme de l'activité humaine : les millions de déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des édifices ou des lieux publics, la simple présence de millions d'êtres humains sont autant de sources de chaleur et de pollutions diverses qui déterminent le microclimat urbain. Certaines villes, comme Mexico (Fig. 1) ou Athènes sont célèbres pour leurs taux de pollution : encaissées dans une dépression, à l'écart des grands vents, tous les sous-produits de l'activité humaine s'y accumulent en quantités dangereuses sous forme solide, liquide et gazeuse.

La figure 2 synthétise les interactions des effets de la densification urbaine sur le microclimat. Les effets de la pollution de l'air, de l'imperméabilisation et du tassement des sols y sont présentés. Les chiffres donnés sont basés sur la comparaison de valeurs actuelles par rapport aux moyennes (sur 30 ans) hors milieu urbain.

Paris a vu sa température moyenne augmenter de 6 °C en un siècle. On recensait 56 jours de gel autrefois, mais seulement 22 dans les années 1970. Les constructions et le réseau routier urbain constituent un formidable réservoir thermique. La proche banlieue connaît des températures bien inférieures à celles de Paris ; gel, givre et brouillard y sont plus fréquents. Il n'est pas rare qu'en hiver, un habitant de la banlieue arrivant à Paris subisse un écart thermique de plus de 10 °C au petit matin. L'humidité et le régime des précipitations se sont également modifiés : 100 jours de brouillard par an en 1920 et seulement 10 dans les années 1980. En ville, les averses sont rapidement évacuées par les égouts et n'ont plus le temps de rafraîchir l'air ambiant, sauf à proximité des grands parcs publics. La ville connaît des quartiers plus chauds que d'autres et le déplacement des masses d'air s'y conforme. Ainsi, les quartiers les plus chauds sont les plus pollués car ils attirent les brises polluantes.

De manière générale, la ville concentre tous les sous-produits des activités humaines : poussières, hydrocarbures, produits de combustion (SO₃, NO₂ et NO).

L'ozone (O₃), quant à lui, est un constituant normal de l'air. Il y a cent ans, sa concentration moyenne valait environ 20 µg/m³. Dans de nombreuses villes aujourd'hui, elle atteint 60 µg/m³ et peut atteindre des pics de 250 µg/m³. L'ozone est formé par la transformation de polluants (NO_x) émis par les moteurs à combustion. A haute altitude, l'ozone protège la terre du rayonnement UV ; à basse altitude, c'est un gaz irritant et toxique. Lors des périodes de pollution, les admissions dans les services respiratoires des hôpitaux augmentent de 25 à 50 % et les appels d'urgence pour crises d'asthmes se multiplient. A Bruxelles, l'Institut d'Hygiène et d'Epidémiologie a publié un rapport liant les taux de pollution survenus en 1994 à une surmortalité importante : 1 226 décès supplémentaires par rapport à la moyenne prévisible.

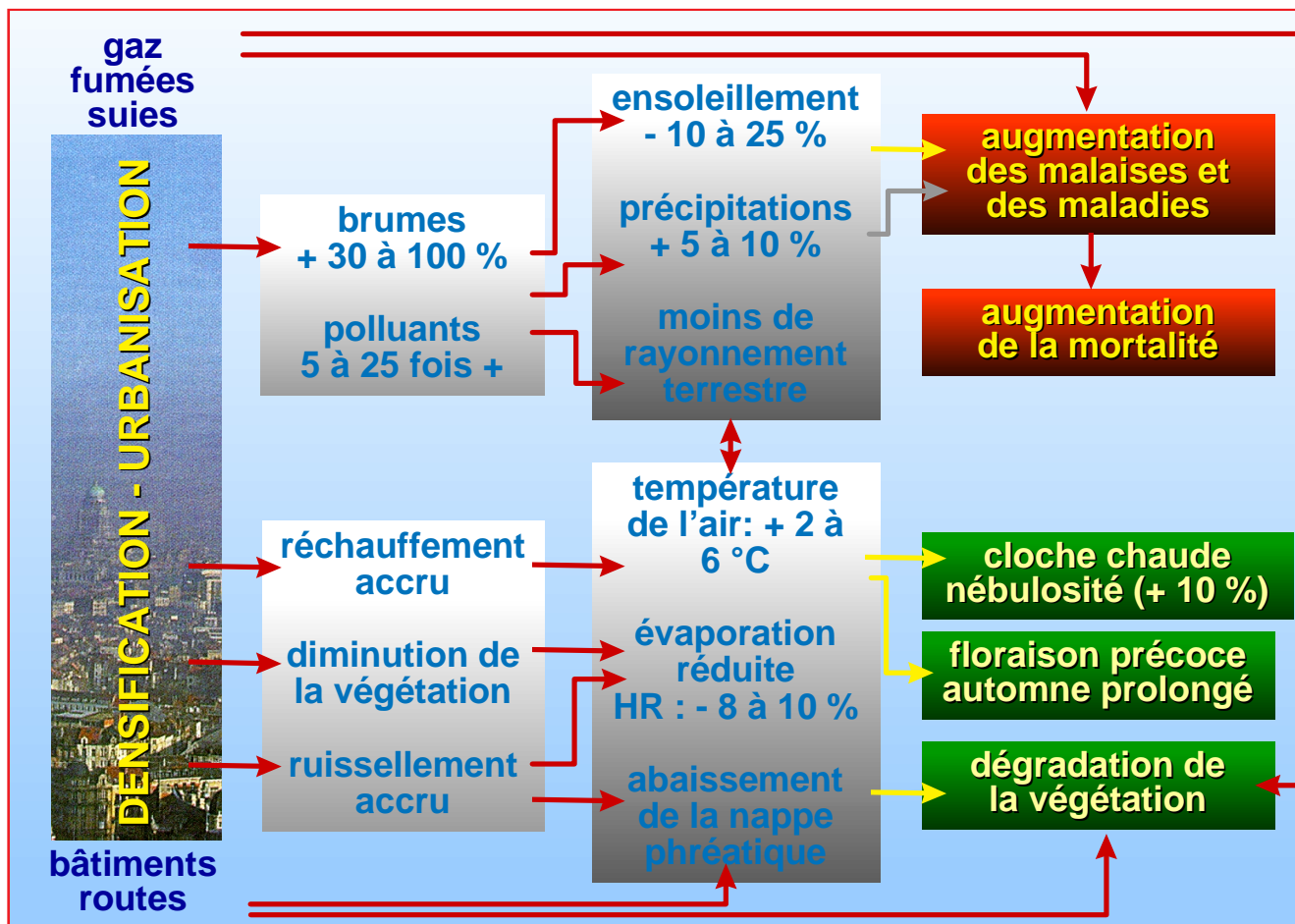
Les bases de bon sens (dormir la fenêtre ouverte, respirer un bol d'air frais en hiver, vivre à proximité des arbres, etc.) n'ont plus cours en ville aujourd'hui, car l'air y est chargé de poussières et de polluants que la végétation retient dans ses feuilles.

En concentrant ses activités en ville, l'homme y modifie le microclimat : température moyenne plus élevée, modification des précipitations, nébulosité due à la pollution de l'air. Les problèmes sanitaires y deviennent aigus.



La ville de Mexico, étendue au fond d'une cuvette protégée des vents, est réputée pour sa pollution.

1



2 Les modifications du climat urbain par rapport aux données moyennes hors milieu urbain.

Le milieu rural subit l'influence des techniques agricoles et des retombées polluantes induites par d'autres secteurs de l'activité humaine. De manière générale, le réchauffement de la planète peut induire l'extension des déserts et le recul des terres fertiles (Fig. 1).

Les villes produisent une quantité considérable de déchets solides qui sont généralement entreposés dans les campagnes, faute de place dans les zones urbaines. Ces déchets sont souvent mal contrôlés et peuvent polluer le sol, le sous-sol et les nappes aquifères (Fig. 2). Depuis quelques années, certaines mesures ont été prises notamment en France pour créer des centres d'enfouissement technique dans lesquels seuls les résidus dits "ultimes" peuvent être stockés. Les fumées générées dans les villes et les grands sites industriels se diffusent également dans les campagnes. Les déchets gazeux produits par la combustion des énergies fossiles provoquent la formation des pluies acides qui empoisonnent la végétation et appauvrissent, de manière durable, leur substrat nutritif. La déforestation (Fig. 2) est en partie la conséquence d'un tel phénomène mais elle résulte également d'un besoin en combustible (Afrique orientale), en bois de construction ou d'exportation (Malaisie) ou vise l'extension des exploitations minières ou des fermes d'élevage (Brésil).

La modernisation des techniques agricoles modifie également le paysage : par exemple, les haies traditionnelles ont été arrachées pour remembrer les petites parcelles en grandes surfaces se prêtant mieux à l'utilisation des machines. Leur disparition entraîne celle d'une part considérable de la faune et de la flore (biodiversité) et livre les sols à l'érosion. Une part importante de la couche de sol arable est perdue chaque année (10 % aux Etats-Unis), lessivée par les précipitations ou soufflée par les vents. Les sols s'appauvrissent progressivement, ce qui a pour effet d'encourager l'utilisation des engrais. Ces derniers (nitrates, phosphates) ainsi que les déchets et les effluents urbains, les pesticides et les déchets naturels d'élevage (lisier) sont responsables de la pollution des sols, qui ensuite induit celle des nappes aquifères mais aussi celle des rivières et des mers. La qualité de l'eau est et sera un défi majeur du XXI^e siècle. La figure 2 illustre ce problème par une image de la mer Adriatique : des colonies d'algues s'y sont installées en se nourrissant des effluents riches en azote provenant du lessivage des engrais agricoles.

Les besoins en eau ne cessent d'augmenter tant pour les villes que pour l'agriculture (exploitation de terres naturellement peu arrosées, cultures exigeantes en eau, etc.). Par ailleurs, certains projets de grand barrage ou d'irrigation destinés à remédier à ces besoins en eau aboutissent à une modification radicale du climat local. L'exemple de la mer d'Aral est aujourd'hui tristement célèbre (Fig. 2). L'eau nécessaire à l'exploitation du coton fut pompée dans les fleuves alimentant la mer d'Aral. L'apport en eau douce fut par conséquent fortement diminuée et la concentration en sel passa de 10 à 25 %. La mer a reculé, la terre s'est stérilisée (effet des pesticides et de la salinisation), le climat s'est modifié (l'amplitude des écarts de températures moyennes atteint 100 °C) et des vents poussiéreux et violents balayent à présent la région.

Le réchauffement de la planète et la modification du paysage rural (disparition des haies, déforestation, stockage des déchets) et des techniques agricoles (engrais, irrigation) altèrent profondément la qualité de l'environnement.



Le réchauffement de la planète peut induire l'extension des déserts. 1



1 2
4 3



2 1. Déforestation au Brésil ; 2. Décharge sauvage en France ; 3. Assèchement de la mer d'Aral ; 4. Pollution dans l'Adriatique.

Les perspectives d'épuisement des gisements de pétrole et de gaz, ainsi que l'instabilité internationale font monter les prix de l'énergie et rendent probable le maintien de cette tendance dans le futur. Par ailleurs, que ce soit en milieu urbain ou en milieu rural, les effets de la pollution se font de plus en plus sentir. Ces considérations doivent conduire à des comportements plus économes en énergie, afin de réduire tant la consommation en énergies marchandes que les rejets de polluants.

Les économies d'énergie ne datent pas d'hier (voir figure 1). Ainsi en France, l'Agence pour les économies d'énergie (ex-Ademe) a été créée en 1974. Un peu oubliée dans les années 1990, l'idée de contrôler ses consommations énergétiques revient sur le devant de la scène dès la décennie suivante. Le baril de pétrole était à moins de 20 \$ à la fin des années 1990, il dépassait 65 \$ en 2005. Cette tendance haussière pourrait bien se maintenir puisque les consommations mondiales d'énergie grimpent à un rythme moyen de 2 % par an (3,4 % pour la consommation de pétrole en 2004). Au rythme actuel de consommation, les gisements de pétrole et de gaz existants devraient se tarir vers 2045 pour le pétrole et 2075 pour le gaz. L'ère des énergies fossiles bon marché est donc passée. D'autant que les experts sont tous d'accord sur le fait que la production pétrolière va atteindre un maximum, le fameux "pic" de production, au cours des 15 prochaines années.

Si les ménages comme les industriels sont sensibles aux économies directes, l'effet "portefeuille" est moins efficace dans les secteurs des transports et du tertiaire. Dans ce dernier cas, les économies d'énergie peuvent pourtant s'avérer très importantes. Un bâtiment comprend un ensemble complexe de composants, comme l'éclairage, le chauffage, parfois la climatisation ou encore les consommations d'eau. Les déperditions thermiques d'un bâtiment mal isolé sont importantes et impliquent des consommations d'énergie considérables pour le chauffage des pièces. L'éclairage représente aussi une source de consommation importante. On sait aujourd'hui construire et rénover des bâtiments pour les rendre économes en énergie. Alors qu'en France un logement ou un bureau consomme en moyenne 200 kWh par m² et par an, on sait ramener ces besoins à 15 kWh/m²/an selon la technique des bâtiments dits passifs.

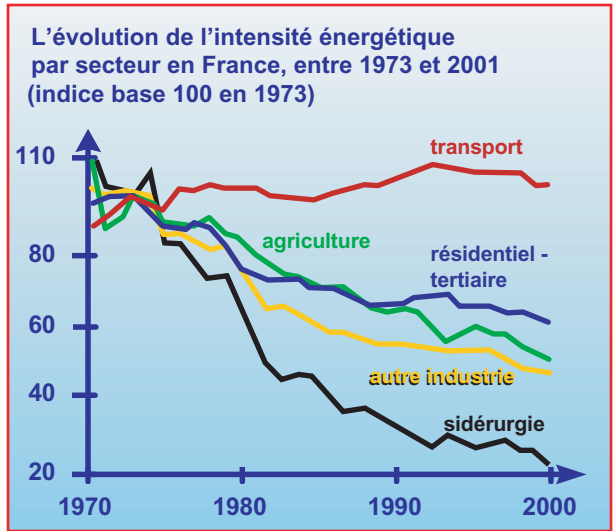
La figure 2 présente les consommations de deux logements. Celui de gauche est peu isolé. Celui de droite est à la fois mieux isolé et mieux conçu pour tirer parti des apports solaires. Dans les conditions du calcul et pour un même volume chauffé, on remarque que, à une réduction des déperditions de 40 % (de 188 kWh/m²/an à 111) correspond une réduction des dépenses en énergies marchandes de 66 % (de 220 kWh/m²/an à 67). Cela est rendu possible par des équipements améliorés (les pertes techniques sont réduites), mais aussi par des gains solaires nettement plus importants (de 24 kWh/m²/an à 57). Le bilan des fenêtres passe de -6 kWh/m²/an (gains = 24 ; pertes = 30) à + 20 kWh/m²/an (gains = 57 ; pertes = 37).

Il est à remarquer que, si les déperditions par rejets sont réduites de 39 % (de 13 à 10), les émissions de polluants sont proportionnelles aux quantités d'énergie finale consommées et sont donc elles-mêmes réduites de 66 %.

La diminution de la consommation d'énergie peut s'obtenir sans perte de confort par l'amélioration de la conception et des composants du bâtiment.

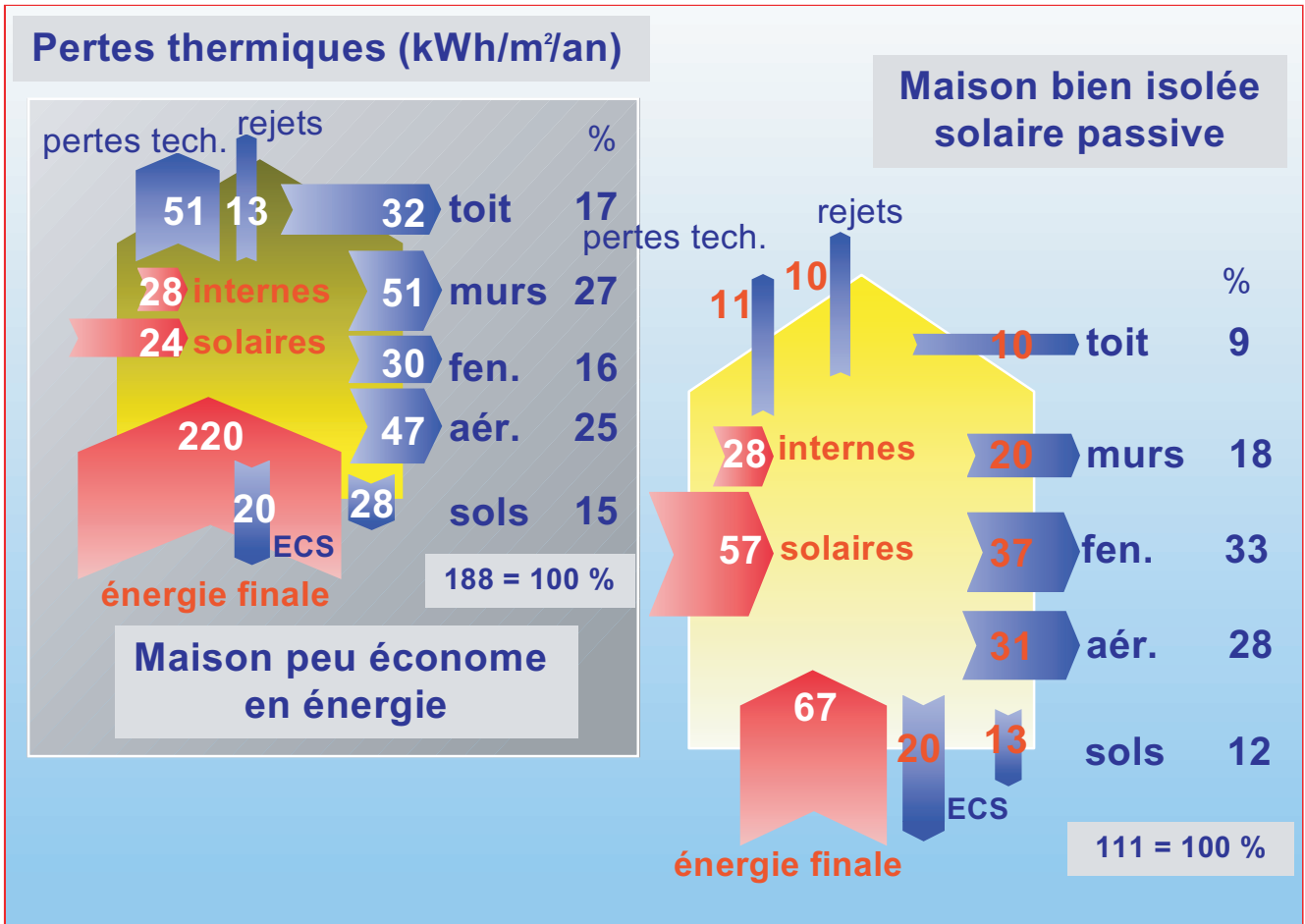
Économiser l'énergie, c'est obtenir le même confort en utilisant moins d'énergie.

C'est également rejeter moins de polluants dans l'atmosphère.



L'intensité énergétique mesure la quantité d'énergie primaire consommée par unité de valeur ajoutée. (Source : Observatoire de l'Économie, de l'Énergie et des Matières premières, ministère de l'Industrie, janvier 2003).

1



2 Consommations comparées entre des bâtiments à performances énergétiques différentes.

L'intérêt porté par les pouvoirs publics à la question de la maîtrise de l'énergie remonte aux chocs pétroliers de 1973 et de 1976. Malgré ces avertissements, les baisses des cours du pétrole qui ont suivi n'ont pas favorisé l'ancrage permanent d'une utilisation rationnelle de l'énergie. Au cours des années 1990, les consommations d'énergie sont reparties à la hausse, notamment dans le secteur tertiaire et surtout dans le domaine des transports.

La maîtrise de l'énergie repose sur le contrôle des quantités d'énergie consommée (économies d'énergie) et des types d'énergies utilisées (choix du vecteur énergétique conditionnant l'indépendance d'un pays vis-à-vis d'éventuels pays fournisseurs). La figure 1 compare les coûts moyens de construction d'une école bâtie en 1993 (885 € HT/m²) aux coûts induits par la consommation d'énergie (chauffage, eau chaude, éclairage, cuisson, etc.) sur la durée de vie du bâtiment (30 ans). À gauche, on trouve les données d'une école "classique" (parmi un échantillon de 3000 établissements) dont la consommation annuelle moyenne est de 190 kWh/m²/an. À droite, les données sont celles d'un collège neuf de l'Yonne dont la consommation en 1987/1988 s'est élevée à 60 kWh/m²/an. Pour chaque groupe de données, la première barre représente le coût de construction par mètre carré (885 €); les deux autres indiquent le coût de l'énergie par m² sur 30 ans pour l'électricité (tarif moyen de 0,15 € par kWh) et pour le fioul (prix moyen de 0,03 € par kWh PCI¹). La figure 1 permet de souligner tant l'importance de la performance énergétique du bâtiment (réduction des consommations) que celle du choix du vecteur énergétique (réduction des coûts).

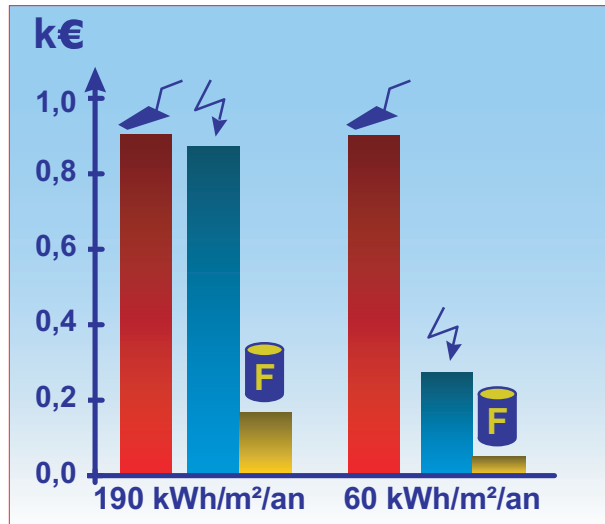
L'utilisation rationnelle de l'énergie couvre toutes les actions qui permettent d'obtenir le confort nécessaire à l'habitat et au travail en utilisant au mieux les ressources énergétiques. Bien utiliser ces ressources implique de prendre en compte la consommation d'énergie et son coût, les processus organisationnels, le comportement des individus, les nuisances et les effets polluants.

La figure 2 montre un accroissement constant des consommations énergétiques dans le monde, une tendance qui se poursuivra à l'avenir, notamment dans les pays du Sud. Les consommations de ces pays, bien inférieures à celles des pays du Nord, augmenteront fortement. Le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord doubleront leur consommation entre 2000 et 2020. Les chiffres cumulés de l'ensemble de l'Afrique et du Moyen-Orient montrent une consommation en 1990 de 618 Mtep², qui passe à 843 en 2000 et qui s'envolera à 1606 en 2020. D'une manière générale, les pays du Sud connaissent des conditions d'urbanisation, de croissance démographique et d'essor industriel, en particulier en Chine, en Inde et au Brésil, qui reposent sur une consommation énergétique élevée. Pour les pays du Nord, lorsque les chiffres mentionnés sont comparés à ceux des décennies précédentes, on constate, en fait, une décélération de la croissance de la demande énergétique explicable autant par le développement de l'efficacité énergétique que par des phénomènes de saturation de la consommation. Quant à la chute des consommations en l'Europe de l'Est entre 1990 et 2000, elle fait suite à l'effondrement de l'économie de l'ancien bloc soviétique et à l'acquisition d'équipements utilisant efficacement l'énergie. Mais l'extrapolation à 2020 met, là aussi, en évidence une tendance à la hausse.

¹ Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente la quantité réelle de chaleur qui peut être produite par un combustible lors d'une combustion où la chaleur de vaporisation de l'eau n'est pas récupérable, ce qui vaut pour la plupart des systèmes de combustion classiques.

² Mtep = million de tonnes équivalent pétrole. Une tep est l'énergie contenue dans une tonne de pétrole, soit 1 165 litres de fioul.

Le monde doit faire face à l'épuisement prévisible des réserves fossiles, alors que les besoins en énergie progressent.



1 Coûts comparés par m² de construction et de consommation (chauffage et éclairage) d'une école sur 30 ans.

Mtep	1990 Observé	2000 Observé	2020 Extrapolé
Europe de l'Ouest	1 468	1 625	1 990
Europe de l'Est	1718	1 227	1 277
Amérique du Nord	2 178	2 603	3 718
Amérique latine	517	691	1 234
Afrique	618	843	1606
Asie-Pacifique	2 351	3 116	5 513
Total	8 850	10 105	15 338

2 Extrapolation à 2020 de la consommation énergétique si les tendances 1990-2000 se poursuivent. (Source : Les Cahiers de Global Chance n°16, novembre 2002)

La terre connaît cinq grands types de climats classés selon la température et l'humidité : climat tropical, climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid (Fig.1). Cette classification peut encore être affinée par les cycles saisonniers tels que la mousson ou des caractéristiques géographiques comme la proximité des océans, l'altitude, les forêts, etc.

Les climats tropicaux (climats de forêt humide, de mousson, ou de savane) se rencontrent entre les latitudes 15°N et 15°S (voir Cayenne, Guyane, figure 2). Ils sont caractérisés par une faible fluctuation saisonnière. La température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit. L'humidité relative tourne autour de 75 % toute l'année. Le rayonnement solaire est important, même s'il est partiellement atténué par la couverture nuageuse ; le vent est faible ; les précipitations sont importantes.

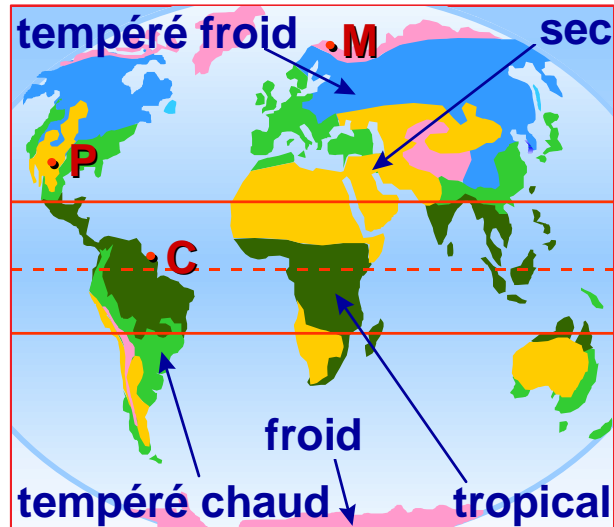
Les climats de mousson se rencontrent autour des tropiques du Cancer et du Capricorne. Ils sont caractérisés par une longue saison chaude et sèche et une courte saison chaude et humide. La température de l'air varie entre 32 et 43 °C le jour et entre 21 et 27 °C la nuit, en période sèche. En saison humide, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 24 et 27 °C la nuit. Le différentiel de température jour / nuit est alors très réduit. L'humidité relative pendant le jour est faible (20 à 55 %), mais augmente considérablement en saison humide (55 à 95 %). Le rayonnement solaire est intense ; les vents sont forts et continus essentiellement pendant la mousson ; les précipitations peuvent atteindre 200 à 250 mm pour le mois le plus pluvieux.

Les climats secs (climats des steppes ou désertiques) se rencontrent entre les latitudes 15° et 30° N et S (voir Phoenix, Etats-Unis, figure 2). Ils sont caractérisés par une saison chaude et une saison froide. La température de l'air varie entre 43 et 49 °C le jour et entre 24 et 30 °C la nuit. En saison froide, la température de l'air varie entre 27 et 32 °C le jour et entre 10 et 18 °C la nuit. Le différentiel de température entre le jour et la nuit est important ; l'humidité relative est faible (10 à 55 %) et le rayonnement solaire est intense ; les vents sont souvent chauds et localisés, porteurs de sable et de poussières ; les précipitations sont très faibles (50 à 155 mm/an). Au voisinage des masses océaniques, ces climats subissent l'influence de l'évaporation importante des mers. L'humidité remonte entre 50 et 90 %, ce qui réduit le différentiel de température entre le jour et la nuit. Les vents se partagent entre brise de mer la journée et brise de terre la nuit.

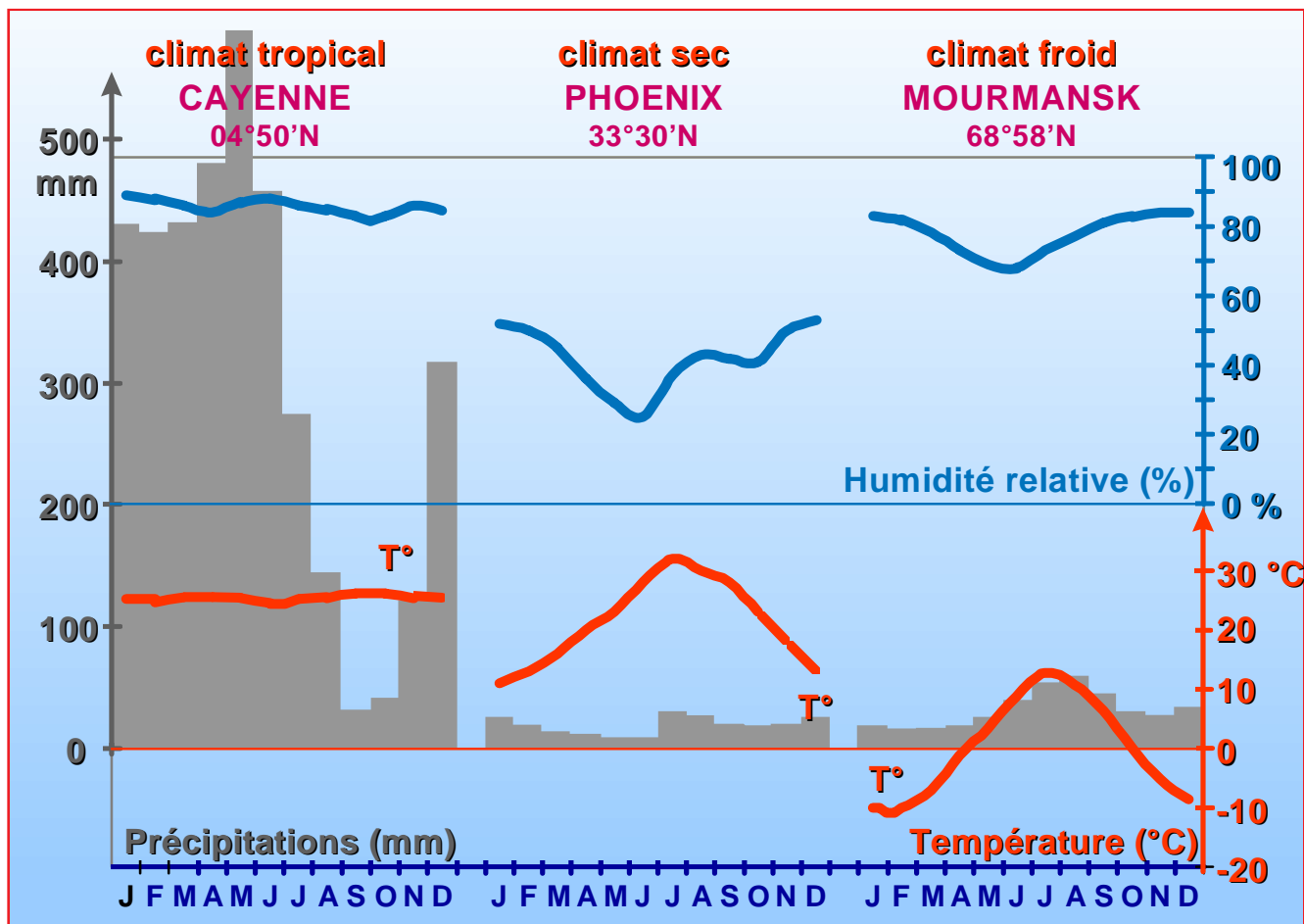
Les climats tempérés sont explicités dans le cadre des climats européens et font l'objet d'une fiche spécifique.

Les climats froids (climats de toundra ou d'altitude et climat polaire) se rencontrent en Amérique du Nord et en Asie. Ce climat continental connaît un été très bref et humide et un hiver long et faiblement enneigé (continent nord-américain) ou très sec et très froid (nord-est asiatique). Les climats polaires se rencontrent au-delà du cercle polaire (voir Mourmansk, Russie, figure 2).

La terre connaît cinq grands types de climats classés selon leur température et leur humidité : climat tropical, climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid.



Distribution des climats tropicaux, secs, tempérés et froids. 1



2 Données climatiques représentatives pour Cayenne, Phoenix et Mourmansk.

La majeure partie de l'Europe bénéficie d'un climat tempéré dans lequel on distingue les zones (Fig.1) :

- nordique maritime,
- tempérée,
- continentale,
- méditerranéenne.

L'Europe est bordée par des régions dont les caractéristiques géographiques sont très contrastées : l'océan Atlantique à l'ouest, la mer Arctique au nord, la masse continentale à l'est et la Méditerranée et les déserts nord-africains au sud.

La figure 2 détaille le profil des courbes de température moyenne, d'humidité relative et de précipitations pour trois villes représentatives de la zone tempérée (Cherbourg), continentale (Berlin) et méditerranéenne (Rome).

Le climat nordique maritime est caractérisé par de longs hivers où les jours sont courts et le rayonnement solaire limité. Les étés y sont généralement doux.

La zone tempérée correspond à la façade atlantique de la France, de la Belgique, des Pays-Bas et de l'Angleterre. Les hivers et les étés sont doux et le rayonnement solaire, limité (voir figure 2 : données climatiques de Cherbourg en France).

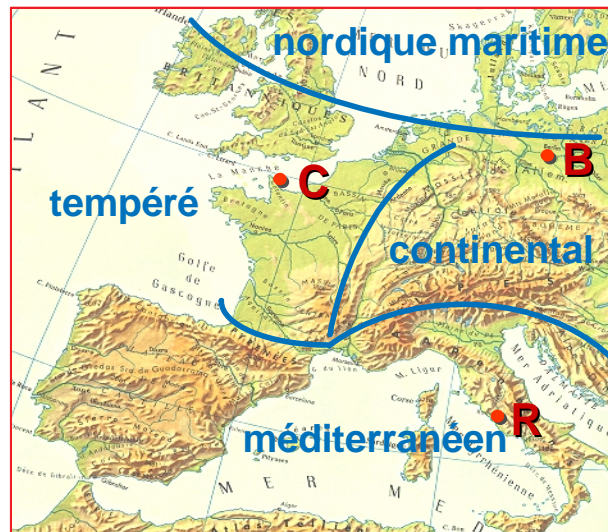
La zone continentale est caractérisée par des hivers plus rigoureux bénéficiant cependant d'une insolation plus importante. Les étés y sont chauds (voir figure 2 : données climatiques de Berlin en Allemagne).

La zone sud correspond à la façade européenne du bassin méditerranéen. Les hivers y sont doux, les jours longs et l'insolation intense. Les étés sont chauds (voir figure 2 : données climatiques de Rome en Italie).

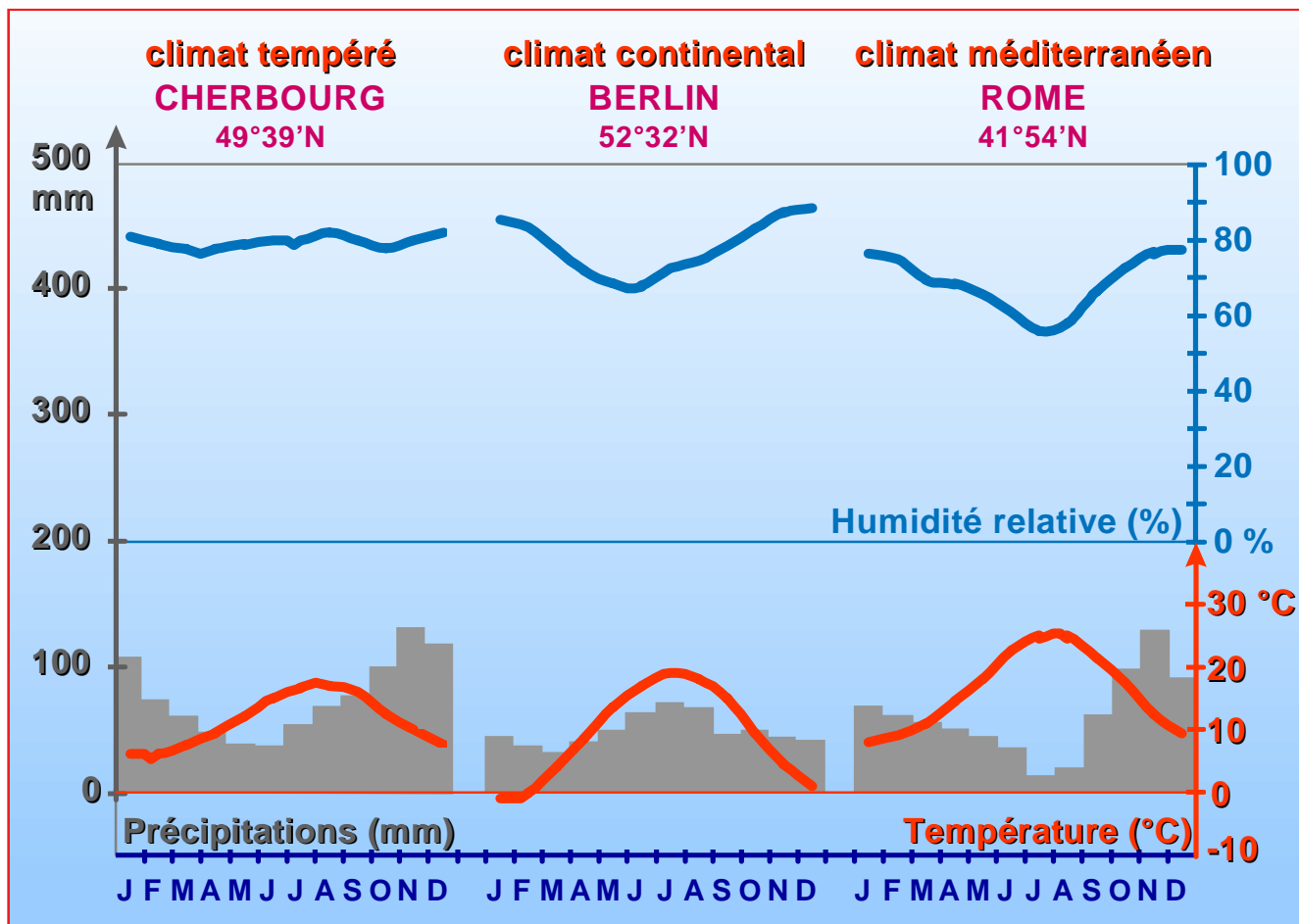
Dans ces régions d'Europe, les vents d'ouest sont généralement humides. En hiver, le Gulf Stream réchauffe et humidifie l'air, ce qui produit un climat assez doux, humide et couvert. En été, les vents d'ouest restent humides mais sont généralement plus rafraîchissants que les vents d'est. L'air étant alors peu chargé en poussières, le rayonnement solaire est relativement intense dès qu'il réussit à franchir la couverture nuageuse généralement présente. La composante diffuse est souvent très importante.

Les vents du nord apportent l'air sec et froid des régions arctiques, tandis que les vents d'est sont responsables de la rigueur des hivers en zone continentale. L'air est alors froid et sec, la nébulosité est faible et l'ensoleillement important. En été, les vents d'est sont chauds et chargés de poussières, ce qui réduit l'intensité du rayonnement solaire effectif. Au sud et à l'est de la Communauté européenne, les vents sont fortement affectés par la présence de la chaîne alpine.

La majeure partie de l'Europe bénéficie d'un climat tempéré dans lequel on distingue la zone nordique maritime, la zone tempérée, la zone continentale et la zone méditerranéenne.



Répartition des 4 familles climatiques européennes. 1



2 Données météorologiques de climats représentatifs : Cherbourg, Berlin, Rome.

L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et la durée d'ensoleillement. Les conditions géométriques du système terre-soleil déterminent la position relative du soleil, qui est repéré par son azimut γ et sa hauteur angulaire α (Fig. 1).

L'azimut est l'angle horizontal formé par un plan vertical passant par le soleil et le plan méridien du point d'observation. Par convention, on donne au sud la valeur zéro.

La hauteur angulaire du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan de l'horizon.

Formule de la hauteur du soleil α à midi :

- au solstice d'été : $\alpha = 90^\circ - \text{latitude} + 23^\circ 27'$

- au solstice d'hiver : $\alpha = 90^\circ - \text{latitude} - 23^\circ 27'$

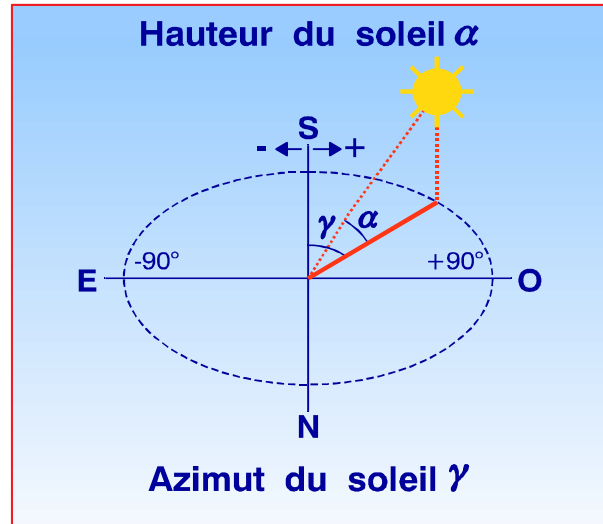
Compte tenu de l'influence de la nébulosité, la course solaire détermine l'exposition énergétique (durée d'ensoleillement) et l'angle d'incidence (intensité). On considère généralement que le rayonnement solaire n'est utile que pour une hauteur $> 10^\circ$, pour tenir compte des obstacles généralement présents dans l'environnement et du faible rayonnement énergétique du soleil au lever et au coucher.

L'intensité du rayonnement varie en fonction de l'angle d'incidence ou, plus précisément, de l'épaisseur de la couche d'air traversée. Géométriquement, il apparaît que pour une hauteur solaire de 30° , les rayons doivent traverser une masse d'air égale au double de l'épaisseur de l'atmosphère. A des hauteurs de 20° et 15° , les rayons ont à traverser l'équivalent de 3 à 4 fois cette épaisseur.

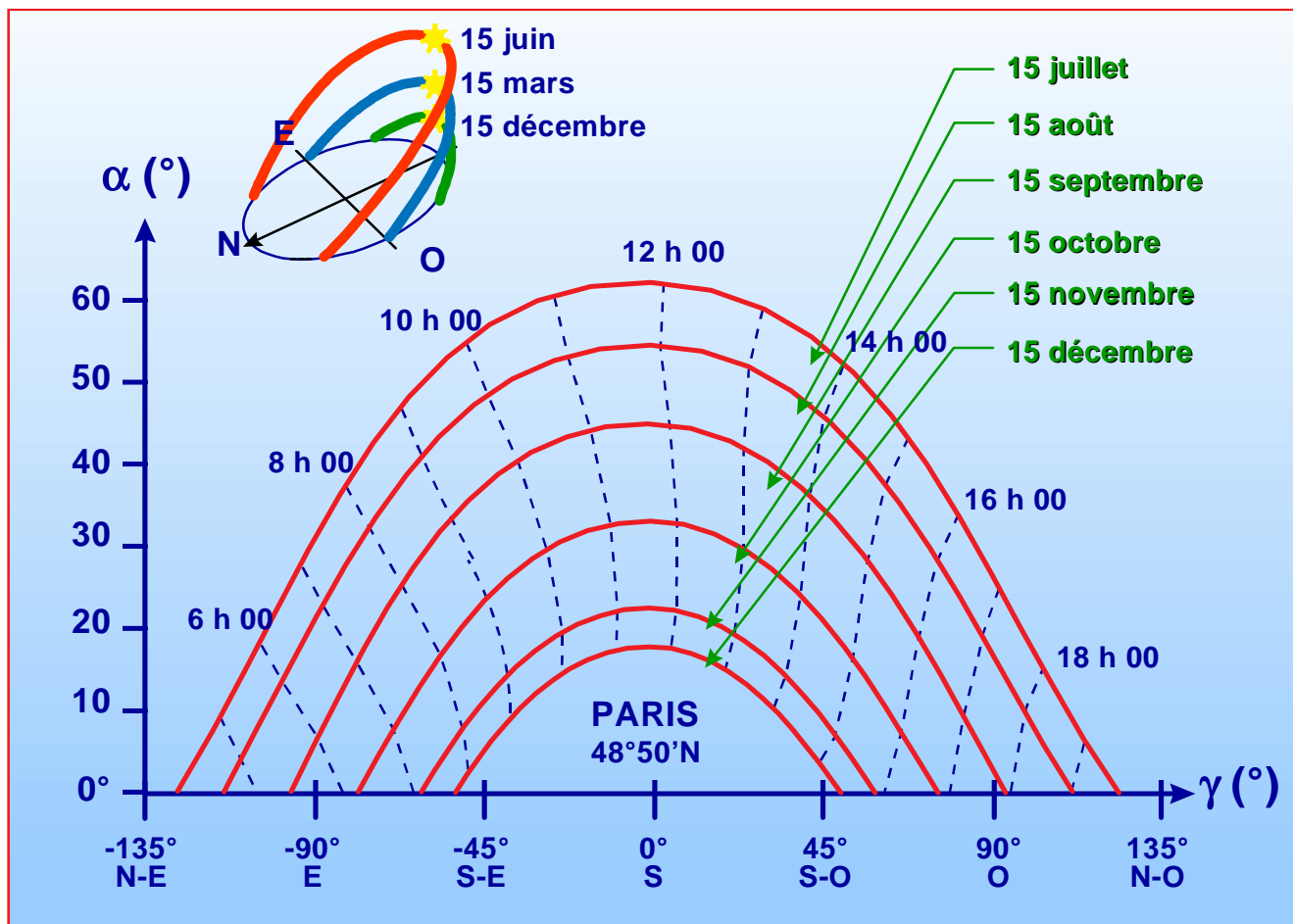
Le diagramme en projection cylindrique (Fig. 2) permet de repérer la position du soleil par son azimut (axe horizontal) et sa hauteur angulaire (axe vertical). Les courbes rouges représentent la course solaire en un lieu donné pour des dates déterminées (généralement le 15 du mois) et pour une période de six mois. Les courbes en pointillés représentent le lieu des équihoraires.

Pour Paris ($48^\circ 50'N$), le soleil affiche au 15 juin une hauteur angulaire de $64^\circ 27'$ à midi (il sera à son apogée le 21 juin, avec $64^\circ 37'$). Au 15 mars et au 15 septembre, cette valeur est à $37^\circ 45'$. Le 15 décembre, la hauteur du soleil est seulement de $17^\circ 54'$ (son minimum étant atteint le 21 décembre : $17^\circ 43'$). Les horaires indiqués sur les courbes correspondent au temps universel.

Le soleil suit une course dont chaque point est déterminé, en un lieu, par sa hauteur angulaire et son azimut. Cette hauteur est maximale au solstice d'été, minimale au solstice d'hiver.



Coordonnées solaires. 1



2 Courbes solaires en projection cylindrique (Paris).

L'ensoleillement est caractérisé par une composante directe et une composante diffuse du rayonnement.

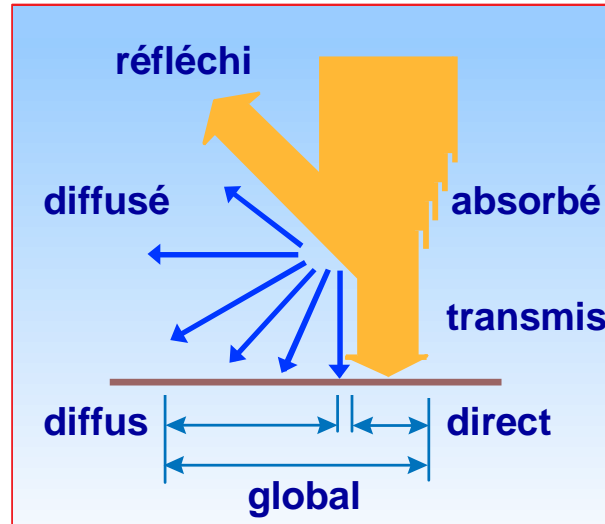
Le soleil émet un rayonnement électromagnétique qui varie peu en dehors de l'atmosphère (constante solaire : $\pm 1\,350\text{ W/m}^2$). Par contre, le rayonnement disponible au sol dépend de la composition de l'atmosphère. En effet, en traversant celle-ci, le rayonnement est partiellement absorbé et réfléchi par les poussières et les microgouttelettes d'eau en suspension. Une partie du rayonnement est également diffusée dans toutes les directions par les molécules d'air et les particules contenues dans l'atmosphère. Ces rayons frappant le sol en un lieu constituent le rayonnement solaire diffus. Le reste du rayonnement atteint directement la terre : c'est le rayonnement solaire direct.

La somme du rayonnement solaire direct et diffus constitue le rayonnement solaire global G . Sous nos latitudes, il vaut approximativement 700 W/m^2 par ciel clair, soit environ 50 % de la constante solaire. On considère que la part du rayonnement solaire diffus peut varier de 10 % pour un ciel clair à 100 % pour un ciel couvert.

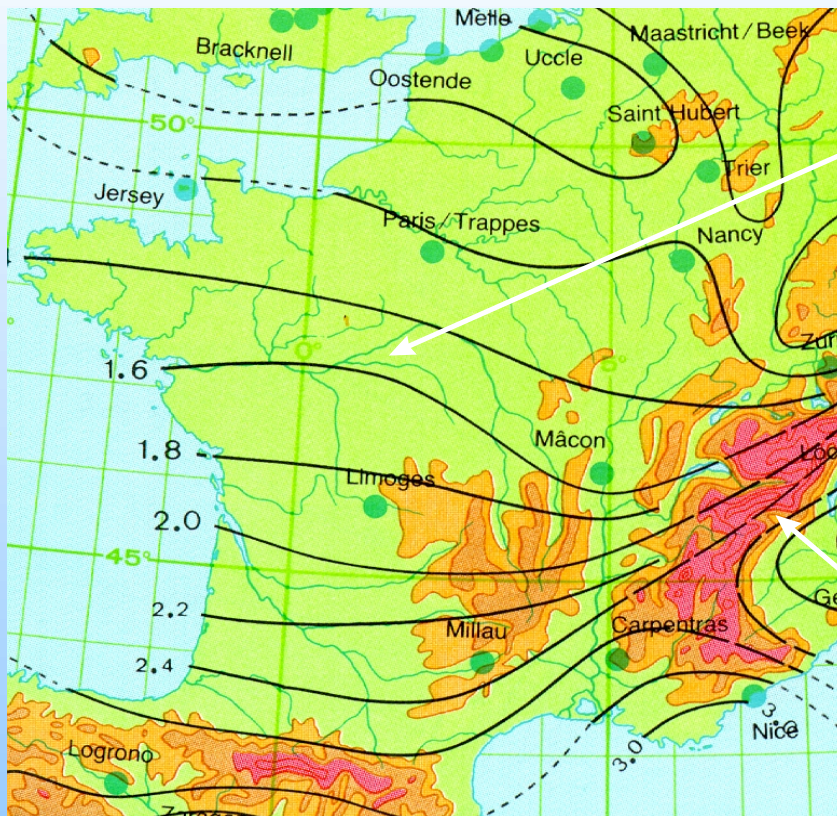
Dans le calcul du rayonnement solaire global G , on est parfois conduit à tenir compte d'un terme supplémentaire : la composante réfléchie. Que ce soit en milieu rural, grâce aux plans d'eau, ou en milieu urbain par la réflexion du soleil sur les bâtiments voisins, cette composante peut s'avérer importante. Par ailleurs, les masses d'eau influent également sur le rayonnement solaire par évaporation et formation de nuages, qui réduisent le rayonnement direct.

La figure 2 présente une carte du rayonnement solaire global moyen journalier sur une surface verticale orientée au sud, au mois de janvier. On note que les courbes de même rayonnement sont bien étagées selon la latitude. A proximité des Alpes, les courbes sont plus resserrées : l'augmentation de l'énergie reçue par rayonnement est plus rapide à mesure qu'on monte en altitude notamment parce que les durées d'insolation sont plus longues.

Le rayonnement solaire disponible en un lieu consiste en une composante directe et une composante diffuse. La valeur de ce rayonnement varie selon la saison, la latitude, l'altitude et les conditions locales de nébulosité.



Composantes du rayonnement solaire global G. 1



Variation du rayonnement en fonction de la latitude

Energie journalière moyenne en janvier, sur une surface inclinée à 30° et orientée au sud (kWh/m²)

Variation du rayonnement en fonction de l'altitude

2 Rayonnement global moyen journalier sur une surface verticale orientée au sud, au mois de janvier (moyenne sur 1966-1975) en kWh/m².

L'ensoleillement est également influencé par la nébulosité : les caractéristiques climatiques et géographiques (relief, proximité de masses d'eau, etc.) qui prévalent en un lieu donné déterminent un profil de nébulosité qui réduit l'ensoleillement théoriquement disponible. Une nébulosité artificielle telle que celle générée par la pollution urbaine peut également réduire le rayonnement solaire jusqu'à 25 % (voire 50 % à Mexico, par exemple).

Trois types de ciels caractérisent le profil de nébulosité. Un ciel clair correspond à des conditions où plus de 80 % de l'ensoleillement théorique (S/S_0) est effectivement disponible. Un ciel moyen représente l'intervalle de 20 à 80 % et un ciel couvert caractérise des conditions où moins de 20 % de l'ensoleillement est disponible.

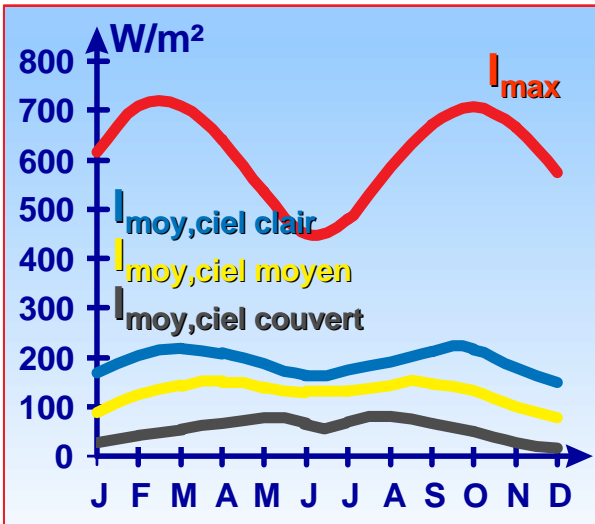
La figure 1 examine l'influence de la nébulosité sur le rayonnement solaire effectif et considère les valeurs du rayonnement solaire sur une surface verticale orientée au sud à Bruxelles. La courbe rouge représente les moyennes des valeurs instantanées maximum du rayonnement à midi, temps universel. L'intensité du rayonnement peut y atteindre des valeurs de plus de 700 W/m^2 . Les trois autres courbes représentent les valeurs du rayonnement moyen pour la journée, compte tenu du type de ciel : clair (bleu), moyen (jaune) et couvert (gris). Les valeurs moyennes sont bien sûr plus basses que les valeurs instantanées : de l'ordre de 200 W/m^2 par ciel clair. La courbe grise représente ainsi la valeur du rayonnement diffus présent en l'absence de tout rayonnement direct.

Il est intéressant de remarquer que les courbes de rayonnement sur les surfaces verticales orientées au sud présentent un minimum en été : l'inclinaison des rayons incidents réduit la transmission de l'énergie (en proportion du cosinus de l'angle d'incidence), ce qui présente un avantage pour le maintien d'une ambiance favorable en été.

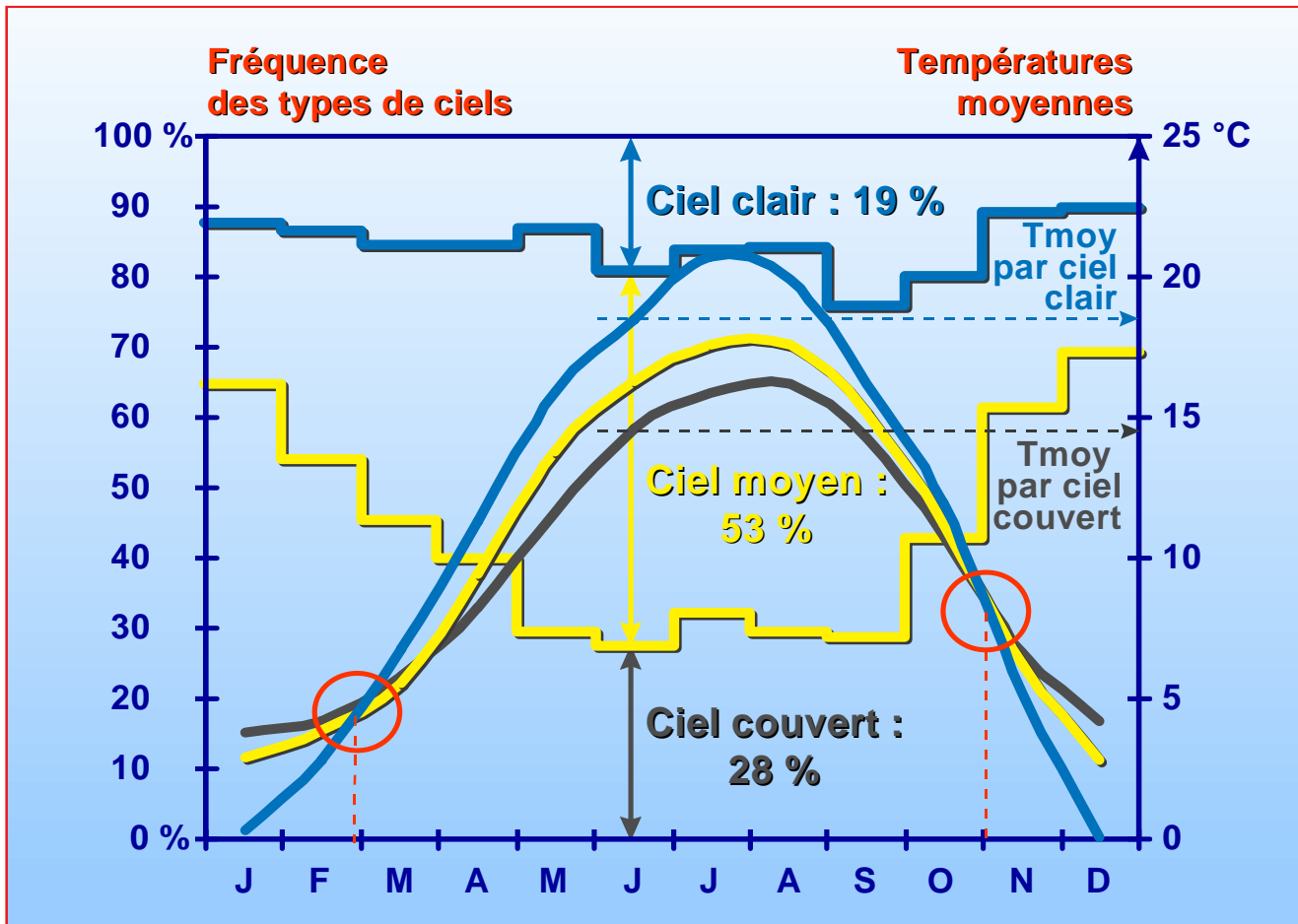
La figure 2 indique la répartition des différents types de ciels pour le climat belge. Au 15 juin, on constate que la fréquence d'un ciel clair n'est que de 19 %, contre 53 % pour un ciel moyen et 28 % pour un ciel couvert. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant de constater qu'en Belgique et dans le nord de la France, le rayonnement solaire est transmis à concurrence de 57 % par la composante solaire diffuse. Les 3 courbes de la figure 2 représentent l'évolution annuelle des températures moyennes à Bruxelles par type de ciel (fuchsia : ciel clair ; jaune : ciel moyen ; gris : ciel couvert). Au 15 juin, la température moyenne est de $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ pour un ciel clair, $16,3 \text{ }^\circ\text{C}$ pour un ciel moyen et $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ pour un ciel couvert.

On remarque 2 points caractéristiques (en février et en novembre) où la température moyenne par ciel clair devient inférieure aux autres températures : l'effet isolant de la couche nuageuse réduit les déperditions par rayonnement vers le ciel et pallie l'absence d'un ensoleillement important.

La nébulosité caractéristique du lieu détermine l'ensoleillement effectif en heure d'ensoleillement et en fréquence de types de ciels.



Rayonnement sur une surface verticale orientée au sud. Rayonnement direct et valeurs moyennes en fonction du type de ciel.



2 Fréquence des types de ciels et températures moyennes par type de ciel à Bruxelles.

La température est un état instable dont les variations au voisinage de l'environnement humain dépendent du rayonnement solaire, du vent, de l'altitude et de la nature du sol.

Le soleil réchauffe l'atmosphère indirectement par l'intermédiaire de la surface de la terre car celle-ci stocke et réémet la chaleur par rayonnement et par convection. La propagation de cette chaleur est alors assurée soit par conduction, soit par diffusion due aux turbulences créées par le vent. La température varie également suivant la couverture nuageuse. Par journée claire, la température tend à s'élever parce que le rayonnement direct est plus important. A l'inverse, la terre, et donc l'atmosphère, se refroidiront davantage la nuit par rayonnement infrarouge vers la voûte céleste.

Les stations météorologiques effectuent des relevés horaires des températures de l'air, sous abri à 1,5 mètre du sol, pour définir la courbe d'évolution journalière des températures en un lieu. On détermine également la température moyenne mensuelle pour tracer la courbe d'évolution annuelle des températures en un lieu.

La figure 1 reprend l'évolution annuelle des températures moyennes pour Berlin (52°32'N). Les valeurs des températures moyennes couvrent en fait plusieurs mesures :

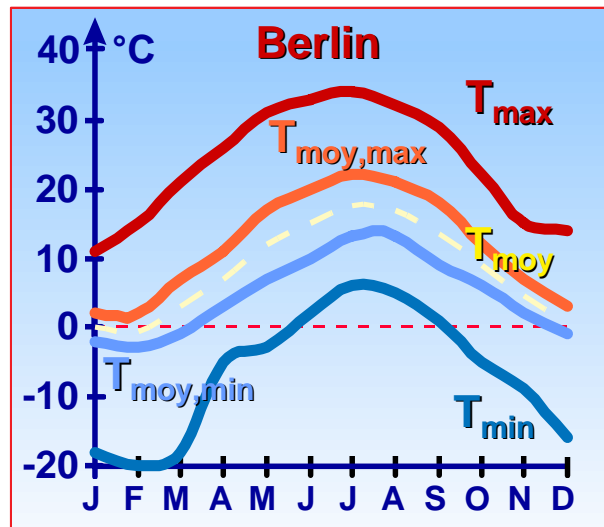
- températures moyennes maximales ($T^{\circ}\text{moy,max}$: relevées entre 12 h 00 et 13 h 00, temps universel) ;
- températures moyennes minimales ($T^{\circ}\text{moy,min}$: relevées au petit matin) ;
- température moyenne (moyenne arithmétique des deux premières) ;
- températures minimales absolues ($T^{\circ}\text{min}$) et maximales absolues ($T^{\circ}\text{max}$) sur 30 ans.

On remarque que les températures n'atteignent pas leur maxima quand l'offre solaire est la plus grande (solstice d'été). Un certain déphasage, de l'ordre de 4 à 6 semaines, est observé et correspond au temps nécessaire pour réchauffer la masse terrestre (inertie de la terre).

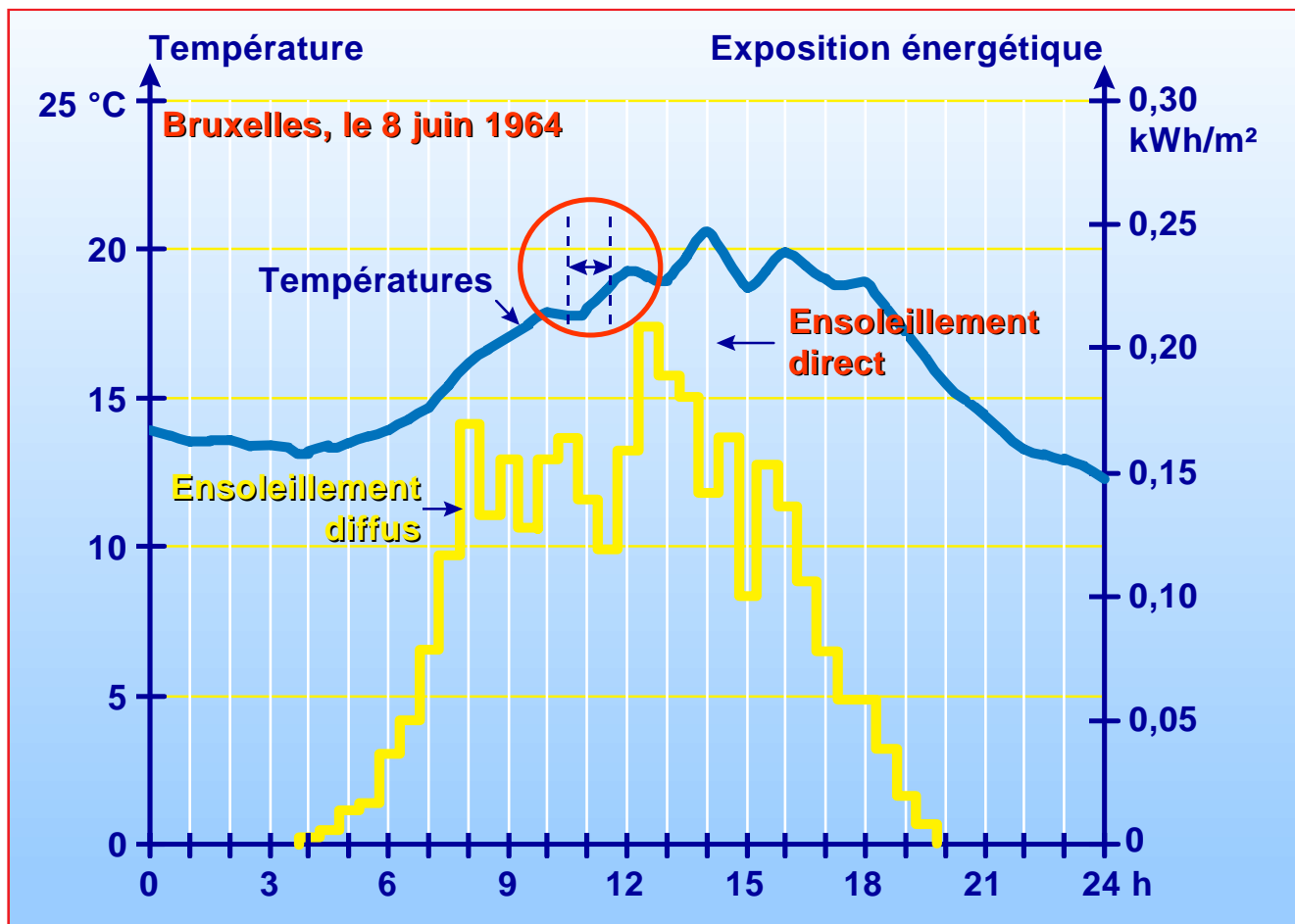
La figure 2 permet de suivre l'évolution des températures (en bleu) pour une journée typique (le 8 juin 1964) à Bruxelles, ainsi que les rayonnements diffus (en jaune) et direct (en rouge) à partir d'un relevé toutes les trente minutes. L'exposition directe est mesurée perpendiculairement au rayonnement, alors que l'exposition diffuse est mesurée sur une surface horizontale.

On relèvera la corrélation et le retard entre l'offre solaire et la réponse des températures (cercle rouge). Le rayonnement diffus varie peu entre les prises de mesure, alors que l'intensité du rayonnement direct peut atteindre des valeurs très élevées tout comme des valeurs nulles (passage de nuages). Le minimum des températures est rencontré au petit matin, juste avant le lever du soleil sous l'influence du rayonnement diffus.

La température est essentiellement influencée par l'ensoleillement, le vent, l'altitude et la nature du sol.



Températures mensuelles à Berlin : minima, maxima et moyennes. 1



2 Evolution de l'ensoleillement direct et diffus et des températures le 8 juin 1964 à Bruxelles.

L'air est un mélange d'air sec et de vapeur d'eau. L'humidité relative HR est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette même température. Elle dépend des précipitations, de la végétation et du type de sol, du régime des vents et de l'ensoleillement, qui peuvent favoriser son assèchement.

L'air est sec lorsque $HR = 0 \%$; il est saturé pour $HR = 100 \%$. Entre 30% et 70% , l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique mais elle reste importante car, dans des conditions de températures données, les échanges thermiques ont lieu surtout par évaporation à la surface de la peau. Aussi, dans une ambiance saturée où il n'est plus possible de transpirer, le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

La quantité maximale de vapeur d'eau pouvant être absorbée est fonction de la température : plus l'air est chaud, plus il peut contenir d'humidité. A saturation, de l'air à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ contient 14 g d'eau sous forme de vapeur. A $30 \text{ }^\circ\text{C}$, il en contient 27 g (ces valeurs sont indiquées sur les diagrammes de l'air humide).

La figure 1 donne les courbes d'évolution des humidités relatives moyennes annuelles à Cayenne, Paris et Phoenix. Cayenne connaît un climat tropical très stable ($T_{\text{moy}} : 25,6 \text{ }^\circ\text{C}$). Paris est soumis à un climat tempéré où les variations de température s'accompagnent d'une variation de l'humidité relative ($T_{\text{moy}} : 12,1 \text{ }^\circ\text{C}$). Phoenix jouit d'un climat sec et chaud ($T_{\text{moy}} : 21,2 \text{ }^\circ\text{C}$).

La chute de l'humidité relative en été permet de grandes variations de température entre le jour et la nuit ($\Delta T > 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Ainsi, en juillet, on obtient une température moyenne pour :

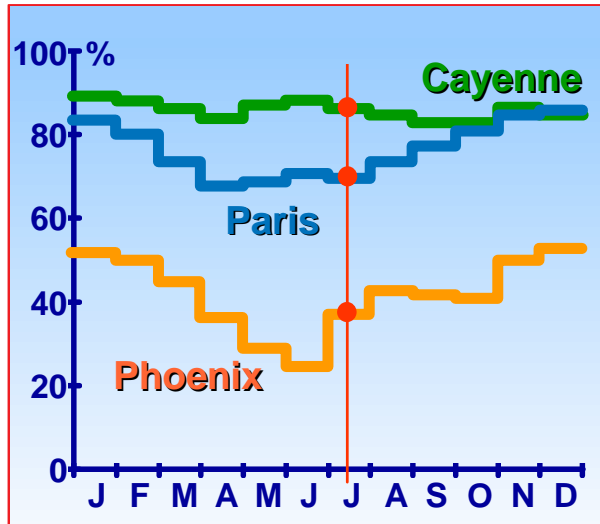
- Cayenne $25,2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour $HR = 86 \%$ (soit 17 g d'eau par kg d'air sec),
- Paris $19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ pour $HR = 70 \%$ (soit 10 g d'eau par kg d'air sec),
- Phoenix $32 \text{ }^\circ\text{C}$ pour $HR = 37 \%$ (soit 11 g d'eau par kg d'air sec).

La figure 2 situe l'évolution de l'humidité relative à Paris par rapport à l'évolution des courbes de température. La ligne bleue représente les mesures de l'humidité relative à $06 \text{ h } 30$, alors que la ligne rouge considère les mesures prises à $12 \text{ h } 30$. On remarque une diminution sensible de HR entre ces deux mesures : le point 1 à $06 \text{ h } 30$ ($HR = 83 \%$) passe en point 2 à $12 \text{ h } 30$ ($HR = 58 \%$).

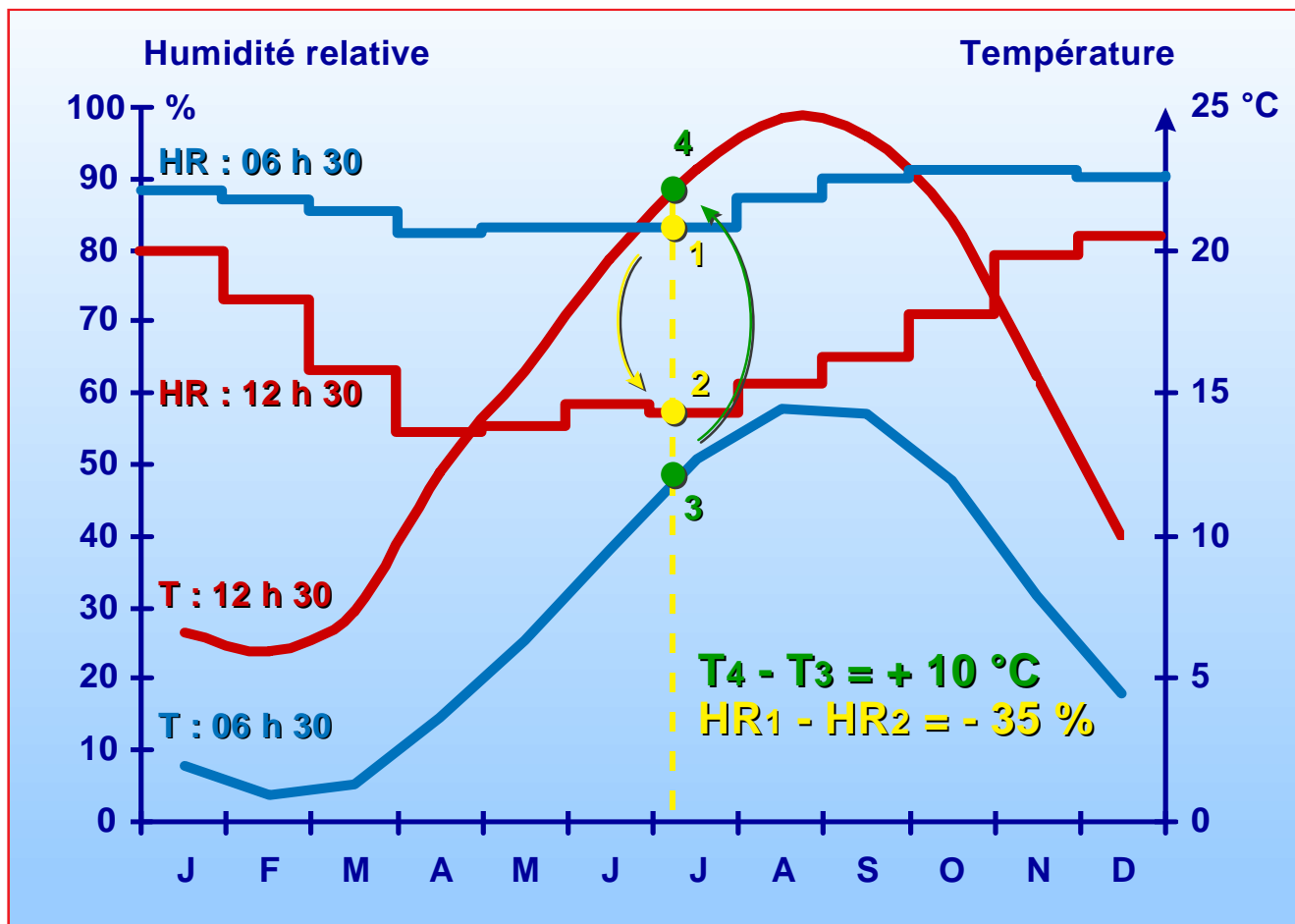
La courbe bleue représente les températures à $06 \text{ h } 30$ et la courbe rouge représente les températures à $12 \text{ h } 30$. Ces dernières sont bien sûr plus élevées qu'au matin ($\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Cependant, la quantité de vapeur d'eau présente, par exemple, au petit matin en juillet est inférieure à la quantité présente à $12 \text{ h } 30$ le même jour (5 g à $06 \text{ h } 30$; 10 g à $12 \text{ h } 30$).

L'augmentation des températures s'accompagne d'une baisse relative de l'humidité. Les deux courbes indiquent l'anticorrélation entre température et humidité relative : des écarts de température importants entre le jour et la nuit ne sont possibles qu'en présence d'air sec.

L'humidité relative HR est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette même température.



1 Evolution annuelle des humidités relatives à Cayenne, Paris et Phoenix.



2 Evolution annuelle des humidités relatives à Paris (06 h 30 et 12 h 30).

Les précipitations recouvrent une réalité multiple : pluie, grêle, neige sont les manifestations d'un même processus fondamental, le cycle de l'eau. La terre compte environ 1,4 milliard de km³ d'eau, mais qui se trouvent à plus de 97 % dans les océans. Une fraction minime (2,59 %) est présente sur les continents sous forme de neige, de glace ou d'eaux souterraines. Enfin, seule une infime proportion (0,014 %) est accessible aux organismes vivants.

La figure 2 illustre le cycle hydrologique. Les chiffres présentés en milliers de km³ sont difficiles à estimer mais ils permettent de se faire une première idée du bilan hydrologique global. Les lacs, les ruisseaux, les rivières et les fleuves sont continuellement ravitaillés en eau douce par la vapeur d'eau atmosphérique, qui précipite sous forme de pluie ou de neige. Sur la surface de la Terre, il tombe en moyenne, chaque année, 1 mètre cube d'eau par mètre carré. Mais ce chiffre varie beaucoup entre les régions équatoriales, où il atteint 2 à 3 mètres cubes, et les déserts où il ne dépasse pas quelques centimètres cubes. Au niveau des océans, sous les climats tropicaux, près de 425 000 km³ d'eau s'évaporent (soit environ 117 cm) et 385 000 km³ précipitent chaque année. Les continents reçoivent 111 000 km³ d'eau par an (± 74 cm), dont 40 000 proviennent des océans et 71 000 de l'évaporation des eaux continentales et de la transpiration des végétaux.

Pour fermer le cycle, on estime que 40 000 km³ d'eau retournent chaque année de la terre à la mer. Sur cette quantité, l'homme ponctionne environ 9 000 km³, ce qui devrait suffire à assurer largement la subsistance de 20 milliards d'êtres humains.

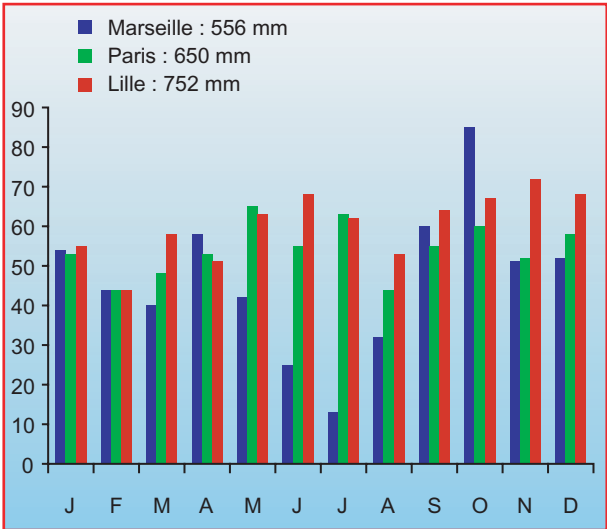
La figure 1 permet de comparer les valeurs des précipitations mensuelles et annuelles à Lille (752 mm en 2004), Paris (650 mm) et Marseille (556 mm). En plus des valeurs quantitatives, il est intéressant de comparer le calendrier des précipitations : été et automne pluvieux à Lille, été sec à Marseille, averses réparties sur toute l'année à Paris. Cet aspect qualitatif donne son caractère à un lieu précis.

Les ressources en eau ne sont pas uniformément réparties. En Islande, les précipitations assurent près de 65 000 m³ d'eau par an et par habitant, alors que ce chiffre est quasiment nul pour les habitants du golfe Persique.

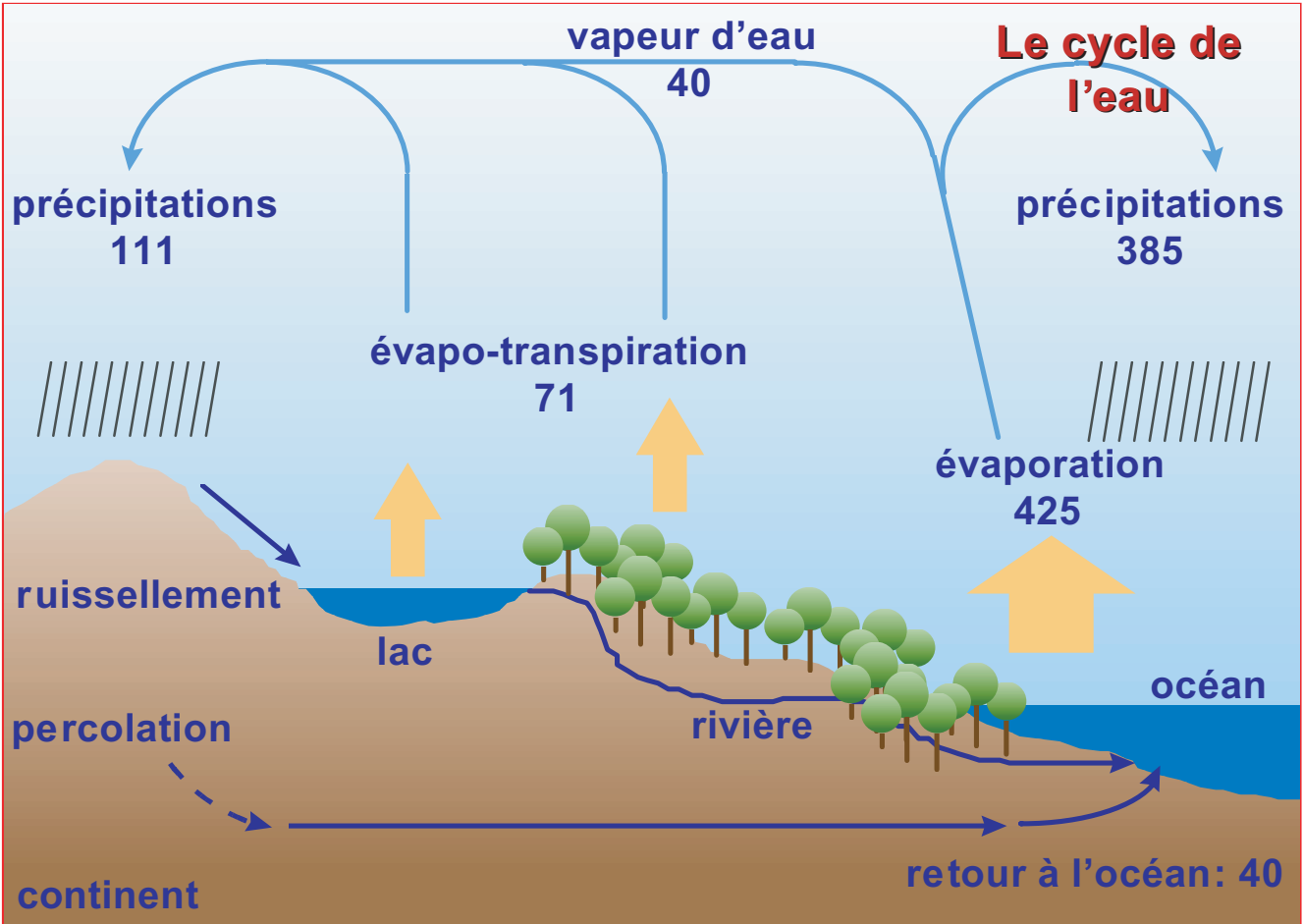
Les consommations sont également très différentes. En 2002, la consommation d'eau globale, en m³ par an et par habitant, était de 1 730 aux États-Unis, 530 en France, 190 en République tchèque contre 20 m³ au Burkina-Faso.

De nos jours, plus de 1,1 milliard d'hommes ne disposent pas du minimum élémentaire de 20 litres d'eau potable par jour. L'accès à l'eau courante dans l'habitation ou dans la cour n'atteint que 24 % en Afrique, 49 % en Asie, 66 % en Amérique latine et aux Caraïbes.

Le régime des précipitations constitue un élément clé d'un climat et d'un lieu.



Précipitations en 2004 à Lille, Paris et Marseille (en mm d'eau). **1**



2 Bilan du cycle de l'eau.

Le vent est un déplacement d'air, essentiellement horizontal, d'une zone de haute pression (masse d'air froid) vers une zone de basse pression (masse d'air chaud). Les différences de température entre les masses d'air résultent de l'action du soleil. Le régime des vents en un lieu est représenté par une rose des vents (Fig. 1), qui exprime la distribution statistique des vents suivant leur direction. Par définition, la direction d'un vent correspond à son origine.

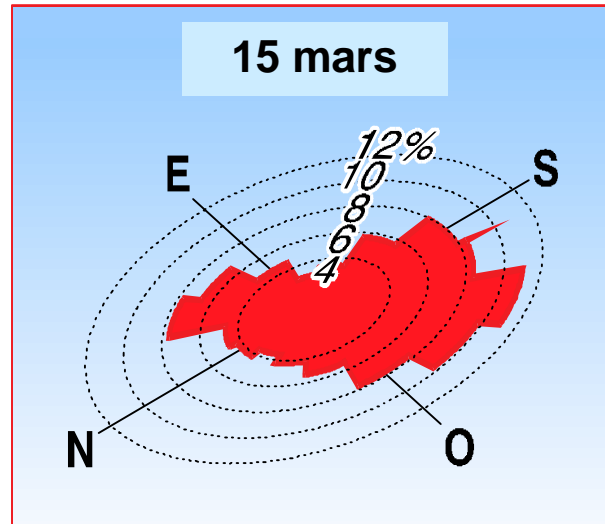
Plusieurs paramètres agissent sur le vent et sa vitesse. Cette dernière augmente avec l'altitude. En effet, le régime des vents est largement conditionné par la topographie locale (vallées, pentes, etc.) et par la rugosité des surfaces. Des obstacles tels que des écrans de végétation touffue peuvent également freiner de façon significative la vitesse du vent. Ces considérations sont synthétisées dans la figure 2 : rugosité du sol faible (lac, plaine), moyenne (forêt, banlieue) ou forte (ville). Plus la rugosité est importante, plus les turbulences au niveau du sol sont fréquentes (plus de 25 % du temps en ville) et provoquent localement des bourrasques inconfortables qui dépendent de la configuration du lieu.

La topographie d'un site n'est pas à proprement un obstacle mais elle peut modifier localement le régime général des vents : effet de foehn, vents de vallée, etc. Les vents de vallée sont généralement violents et fréquents. Le mistral, qui se forme dans la vallée du Rhône, en est un bon exemple : il souffle 1 jour sur 2 à plus de 5 m/s. Ces vents deviennent de plus en plus violents en descendant les vallées et nettoient celles-ci de leur humidité et des brouillards. A proximité du littoral, on rencontre des vents réguliers, faibles à modérés, qui alternent selon un rythme journalier. Les brises de mer soufflent le jour et apportent les embruns marins, alors que les brises de terre, au contraire, procèdent de la terre vers la mer pendant la nuit.

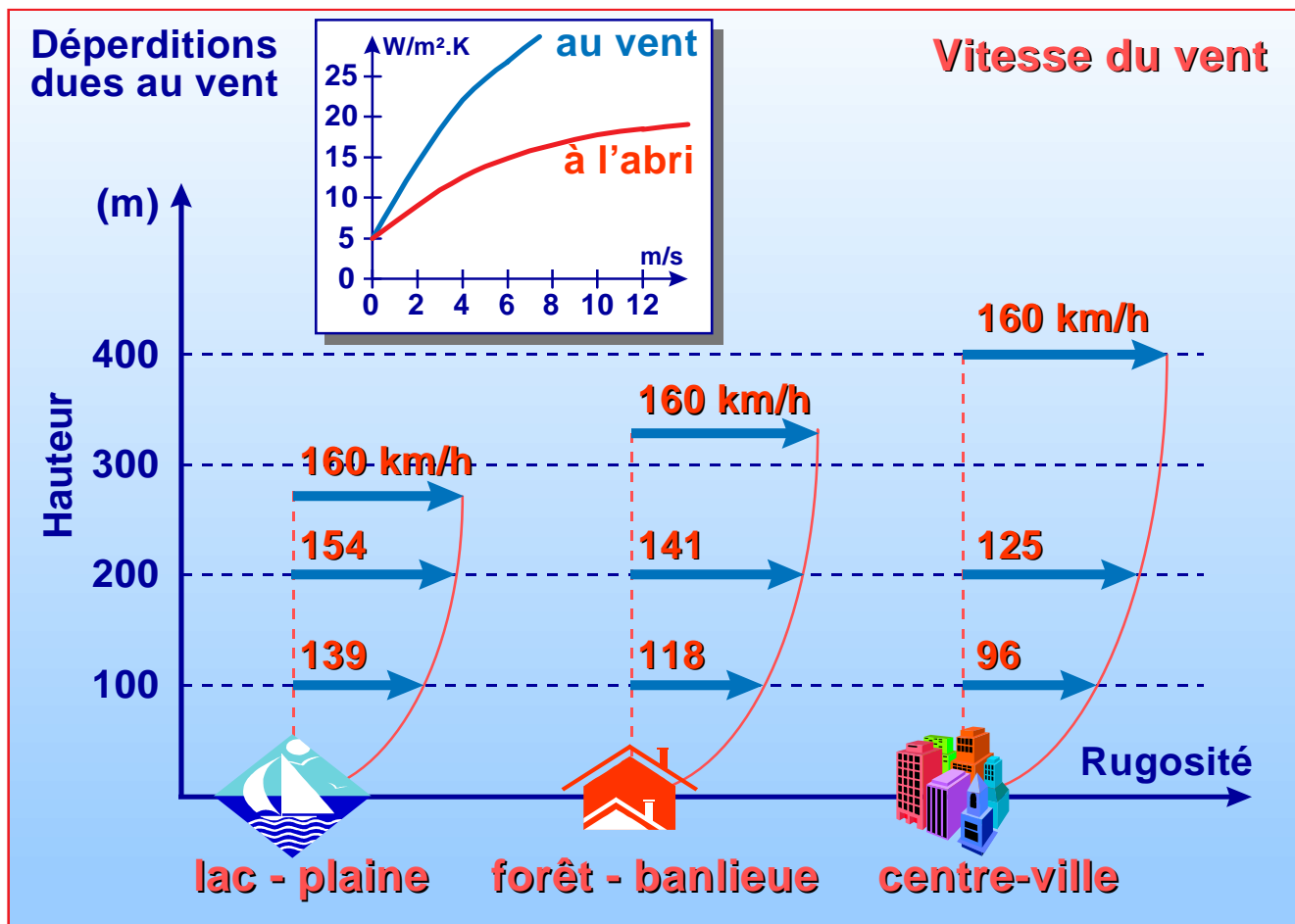
Le vent est généralement bienvenu en été, particulièrement en ambiance humide car il rafraîchit l'atmosphère, tandis que les vents d'hiver sont des sources importantes de refroidissement par convection. La conception des édifices vise donc à utiliser les brises naturelles pour assurer la ventilation mais à se protéger des vents froids d'hiver par une meilleure étanchéité, grâce à la réduction des surfaces exposées au vent ou à l'installation d'écrans extérieurs (murs, végétation, plantes grimpantes, etc).

Les obstacles constituent également des obstructions et provoquent des modifications de la vitesse et de la direction du vent. Les obstacles au vent présentent une surpression sur leur face exposée et une dépression en face opposée. C'est pourquoi, outre la protection qu'ils offrent, les écrans peuvent également occasionner des effets secondaires tels que courants d'air et turbulences.

Le vent est un déplacement d'air, essentiellement horizontal, d'une zone de haute pression (masse d'air froid) vers une zone de basse pression (masse d'air chaud).



Rose des vents (Bruxelles). 1



2 Variations de la vitesse du vent, selon l'altitude et la nature du sol.

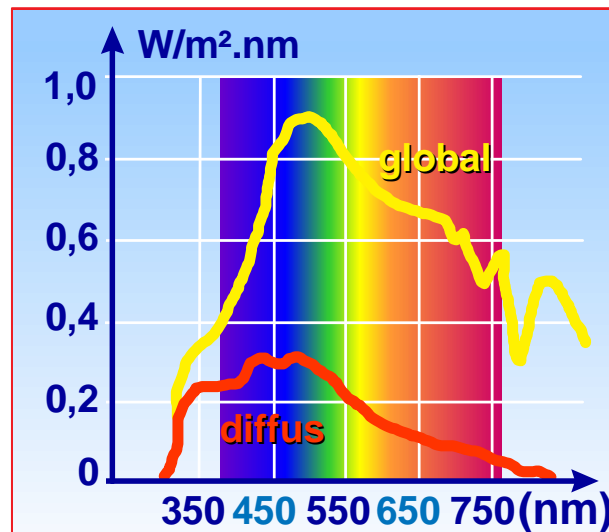
Comme source d'éclairage naturel, la lumière est avec l'ensoleillement le facteur climatique dont il faut tirer parti. Une bonne conception et une utilisation judicieuse d'un bâtiment réduiront les besoins en éclairage même par ciel couvert. Cela suppose de connaître l'éclairement disponible pour un jour et une heure précis. L'étude de l'éclairage naturel dans un bâtiment se base sur les données par ciel couvert correspondant à des conditions extérieures défavorables. Les données par ciel clair constituent des éléments supplémentaires permettant d'évaluer les variations de lumière naturelle dans les locaux.

La lumière naturelle présente un spectre visible (rayonnement dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 760 nanomètres) de forme continue. La figure 1 montre la distribution spectrale énergétique de la lumière naturelle diffusée par ciel clair sur une surface horizontale pour une hauteur du soleil de 30°. La puissance d'éclairement est indiquée en W/m^2 . L'échelle des longueurs d'onde indique le domaine du visible.

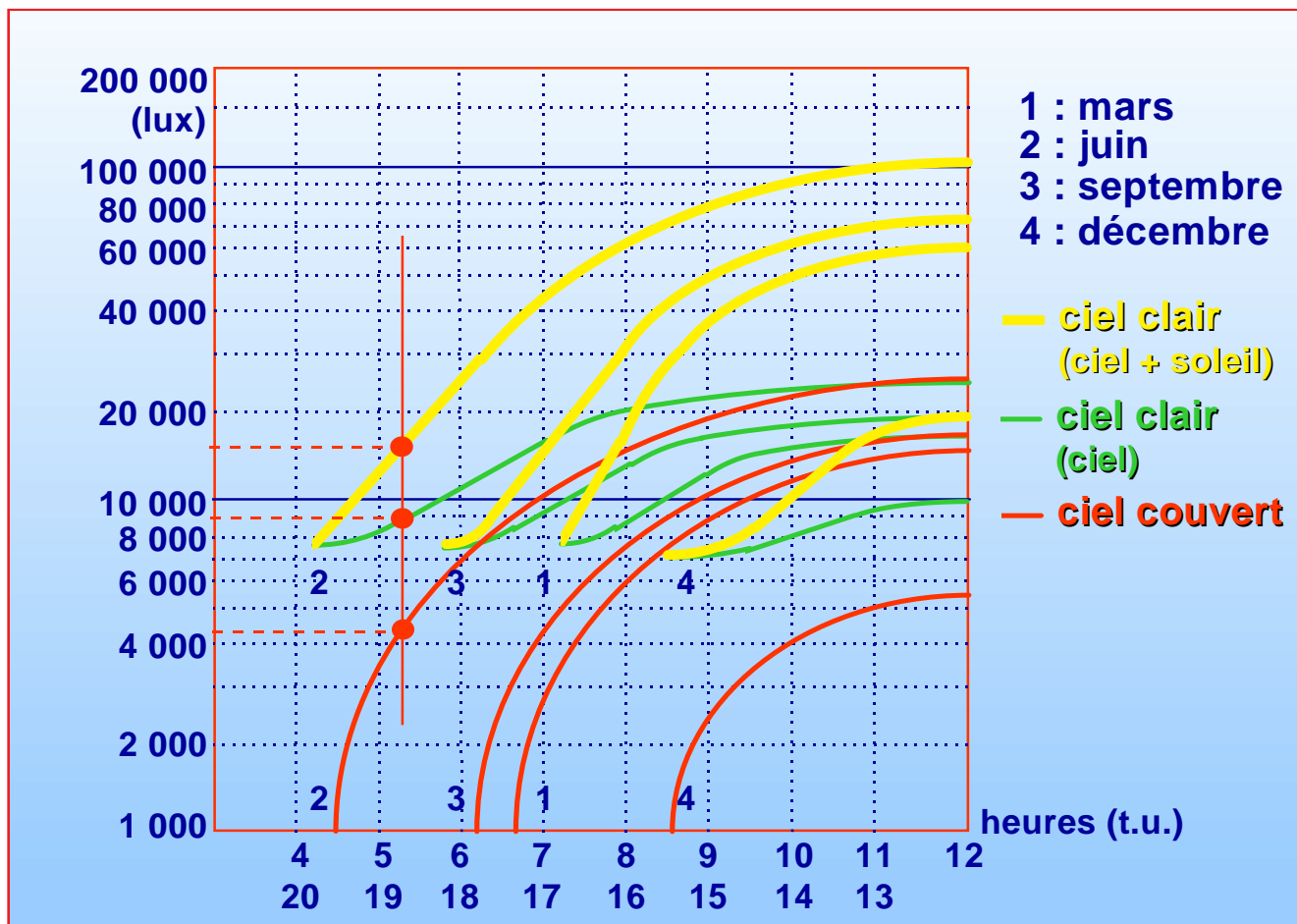
La quantité de lumière reçue en un lieu varie suivant le jour et l'heure considérés. Elle est également influencée par les conditions météorologiques et le niveau de pollution de l'air. La lumière naturelle du jour, par ciel clair et en site dégagé, est exprimée par la somme des éclairements dus au ciel et au soleil : c'est l'éclairement global. En été, la proportion de la lumière du ciel dans la lumière du jour est d'environ 20 % à midi, de 25 % pour une hauteur du soleil de 30°, atteint 50 % pour une hauteur de 10° et avoisine 100 % en dessous d'une hauteur du soleil de 2°. Par ciel moyen, cette proportion est de l'ordre de 50 % tandis que par ciel couvert, elle est de 100 %.

La grande variation de l'éclairement lumineux, mesuré en lux, a pour conséquence de baser les études d'éclairage naturel des locaux sur les conditions minimales d'éclairement. La figure 2 donne l'évolution moyenne horaire de l'éclairement lumineux observé en Belgique sur une surface horizontale, par ciel clair et par ciel couvert, pour quatre mois de l'année. Le graphe est construit sur une échelle verticale logarithmique (gamme d'éclairement très large, de 1 à 200) représentant l'éclairement en lux. L'axe horizontal représente différentes heures du jour. On peut vérifier qu'au petit matin, en juin, l'éclairement correspond à $\pm 4\,500$ lux par ciel couvert (courbe 2 rouge) et à $\pm 15\,000$ lux par ciel clair (courbe 2 jaune). La courbe 2 verte indique une valeur intermédiaire utile pour les calculs d'éclairement dus au ciel seul.

L'éclairement lumineux est un facteur climatique qui varie au fil de l'année.
La lumière naturelle se compose de la somme des éclairagements dus au ciel et au soleil.



Distribution spectrale énergétique de la lumière naturelle par ciel clair. 1



2 Evolution moyenne horaire de l'éclairement lumineux sur une surface horizontale pour quatre mois de l'année en Belgique.

Que ce soit à petite ou à grande échelle, les masses d'eau influencent considérablement le climat.

A l'échelle du microclimat, les étendues d'eau tempèrent les fluctuations de température : bassins, étangs, etc. jouent le rôle de tampons thermiques. Il fait donc moins chaud en été, moins frais en hiver. Dans un climat très chaud et sec, des techniques de micronisation (pulvérisation de gouttelettes d'eau de l'ordre du micromètre en suspension dans l'air) ont été mises à l'essai pour rafraîchir localement les températures, par exemple lors de l'Exposition universelle de 1992 à Séville. Des fontaines et des jets d'eau ont également été répartis sur tout le site. L'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est retirée aux masses d'air, qui ainsi se refroidissent. L'application d'un tel dispositif a permis de réduire localement la température de l'air de quelques degrés.

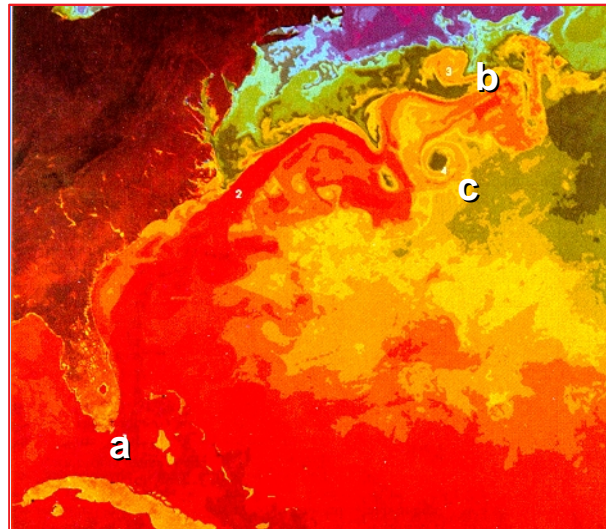
A grande échelle, les mers et océans conditionnent le climat du littoral. Le climat de la façade européenne atlantique est influencé par le Gulf Stream (Fig. 1), courant chaud provenant du golfe du Mexique. Les températures moyennes sont de plusieurs degrés supérieures à celles observées à des latitudes équivalentes sur le continent nord-américain. Le Gulf Stream apparaît comme une rivière chaude en face de la Floride (a). La photographie représente en couleurs artificielles la température des eaux de surface en avril 1984 sur l'océan : 24 à 28 °C (rouge-orange), 17 à 23 °C (jaune-vert), 10 à 16 °C (bleu), 2 à 9 °C (pourpre), et sur le continent : > 20 °C (brun clair) et < 10 °C (brun foncé). Le mélange de ces eaux chaudes avec les eaux de l'Atlantique forme des anneaux chauds (b) ou froids (c).

Par contre, il existe certains courants d'eau froide qui longent les côtes du Pérou ou de l'Afrique du Nord-Ouest.

De manière générale, la très grande capacité thermique de l'eau rend celle-ci peu sensible aux variations de température de l'atmosphère. Sur la frange côtière, la présence conjointe de l'eau et du continent détermine des schémas climatiques particuliers : les brises de mer et les brises de terre (Fig. 2).

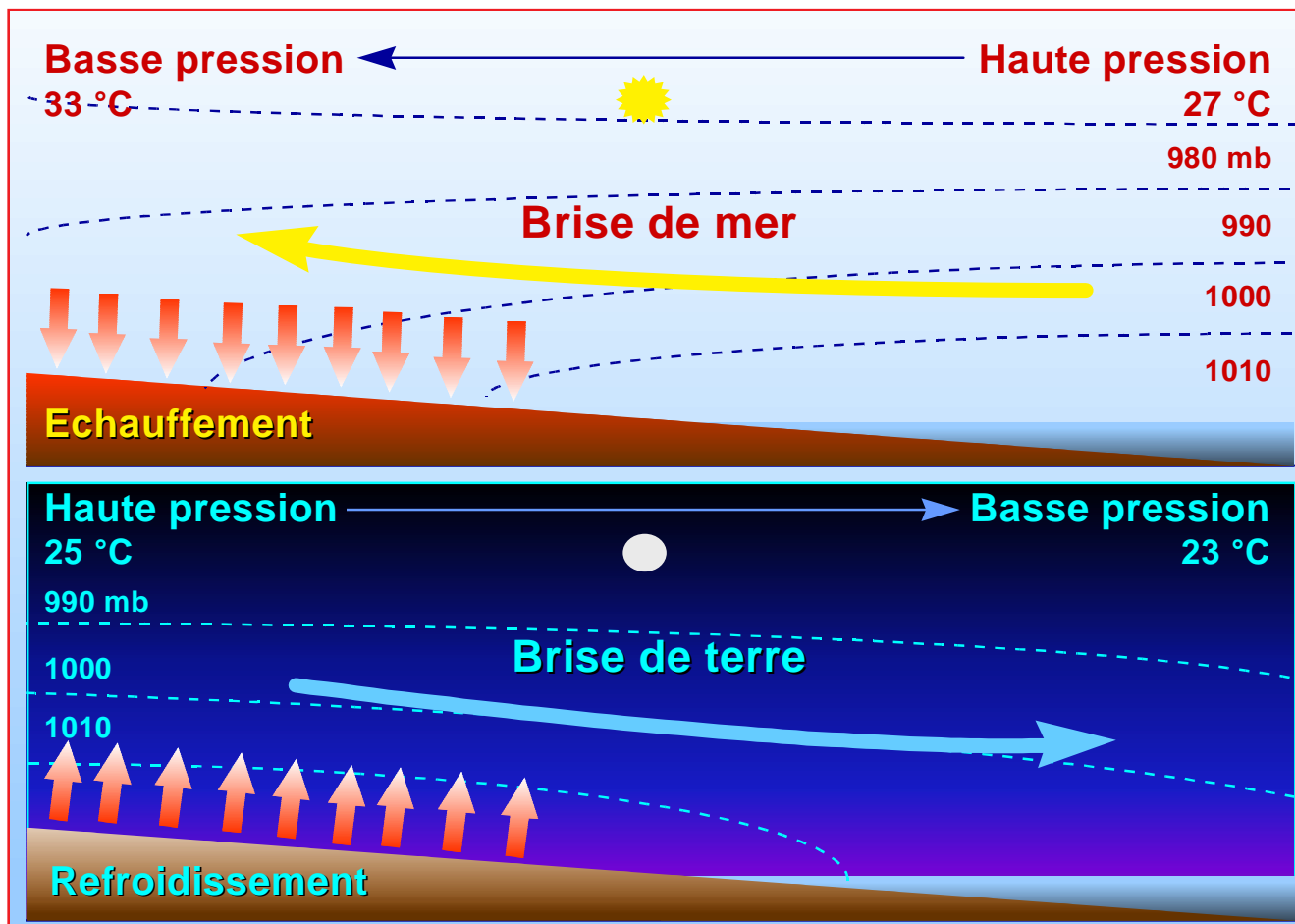
Pendant la journée, un échauffement plus rapide sur terre que sur mer aboutit à la création de basses pressions thermiques dans l'arrière-pays et de pressions relativement hautes en mer. La brise fraîche qui souffle de la mer vers la terre tend à supprimer le déséquilibre ainsi créé. Durant la nuit, la déperdition par rayonnement est plus forte sur terre que sur mer et les courants aériens sont inversés.

La présence d'eau modifie localement l'humidité de l'air. Par son inertie thermique, l'eau joue le rôle de tampon et atténue les fluctuations de température.



Températures des eaux de surface au large de la côte Est des Etats-Unis : le Gulf Stream.

1



2 Brise de mer le jour et brise de terre la nuit : influence de l'inertie thermique des grandes masses d'eau.

Le relief influence la répartition des températures, les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et de régime des vents. Le relief joue sur les températures tant par les variations qu'il induit de jour grâce à l'irradiation des pentes (selon leur orientation et inclinaison) que par son influence sur le régime des vents. Les faces exposées au vent sont plus froides que les faces masquées et si le relief protège certains sites, il en surexpose d'autres.

La figure 1 propose d'examiner l'évolution typique des températures extérieures sur 24 heures dans un relief montagneux. On constate que les vallées sont en général plus chaudes le jour que les sommets. Par contre, de nuit, le soleil n'entrant plus en ligne de compte, l'air se refroidit et s'accumule au fond des vallées et des petites dépressions. Il se crée ainsi une différence de température au profit des pentes directement en contact avec ce qu'on appelle la ceinture chaude. Dans les longues vallées, le phénomène tend à créer un mouvement d'air longitudinal d'autant plus puissant que la vallée est longue et que le gradient de température est élevé.

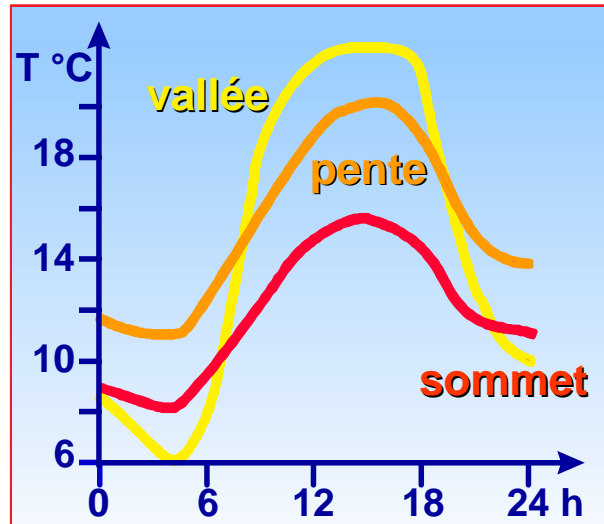
L'altitude influence aussi la température. La pression diminuant avec l'altitude, l'air se détend et se refroidit. Cette diminution de température est de l'ordre de 0,7 °C par accroissement de 100 m.

La figure 2 rappelle les problèmes d'exposition (adret et ubac), d'ombrage mutuel et de ceinture chaude. La topographie peut constituer un ombrage important à l'ensoleillement en hiver, où les vallées orientées est-ouest risquent d'être en permanence à l'ombre. En Europe du Nord, on préférera situer les édifices suffisamment haut à flanc de colline pour bénéficier du soleil même en hiver.

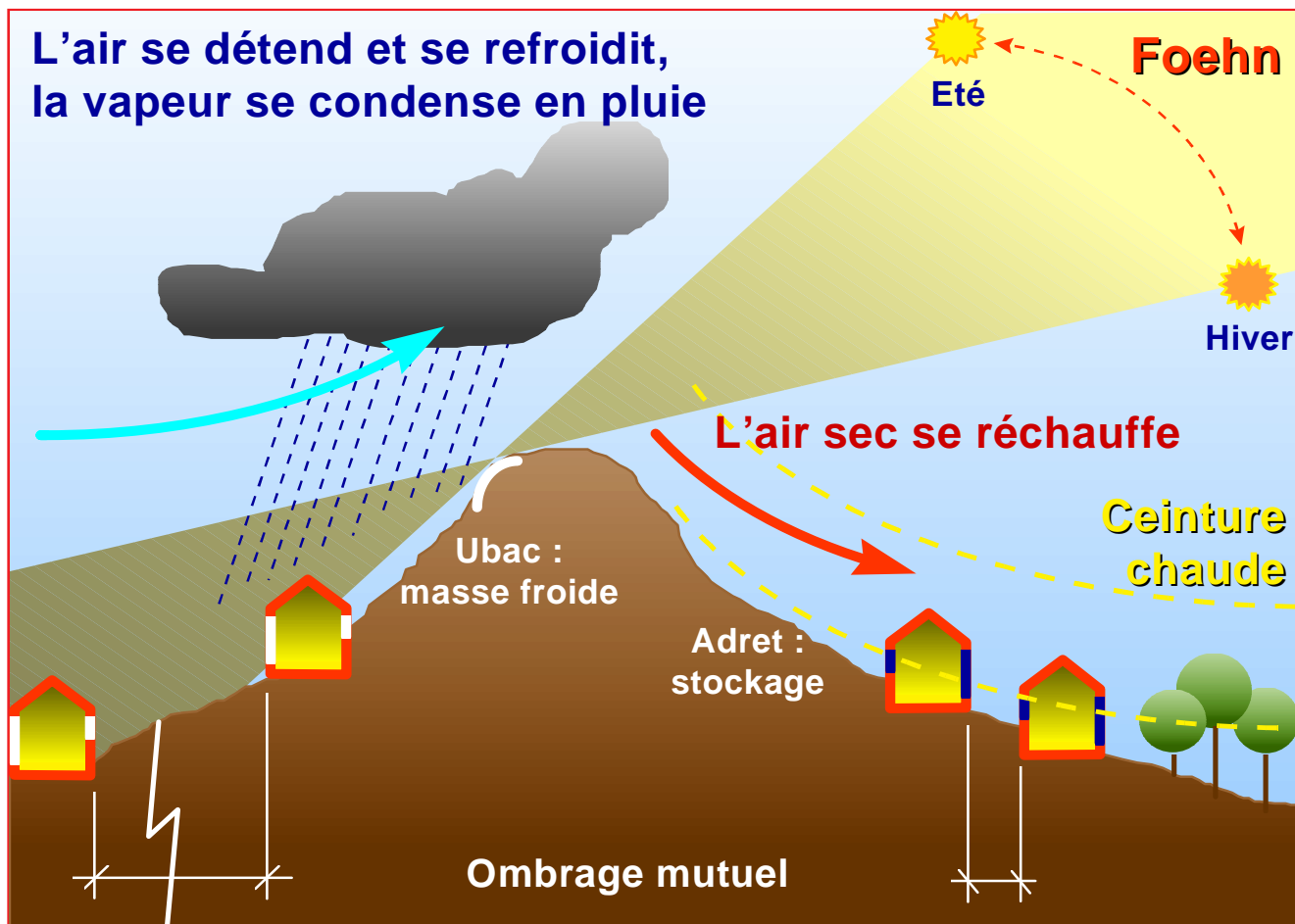
Les variations d'ensoleillement induisent une variation de température entre le haut et le bas des vallées. Cette situation provoque des fluctuations de pression et un mouvement des masses d'air. Les brises remontent les vallées pendant la journée lorsque les sommets bénéficient d'un ensoleillement et d'un réchauffement supérieur à celui de la plaine.

La figure 2 illustre également le phénomène du foehn : la température de l'air décroît à mesure qu'il monte en altitude. Au point de saturation, une bonne partie de l'eau est abandonnée sous forme de pluie ou de neige. Sur l'autre versant, l'air non saturé redescend et se réchauffe par compression pour arriver en pied de montagne avec une humidité relative très faible, souvent inférieure de 30 % à sa valeur de départ, qui lui donne une grande transparence. Cet effet de foehn, assez répandu, peut faire remonter la température de 20 °C en une journée.

Le relief influence la répartition des températures, les possibilités d'ensoleillement ainsi que les phénomènes de nébulosité et de régime des vents.



Variation des températures suivant la situation dans un relief de montagne. 1



2 Influence du relief : adret, ubac et ensoleillement ; effet de foehn.

La végétation offre un ombrage saisonnier des édifices, fait écran contre les vents, rafraîchit l'air par évapo-transpiration et filtre les poussières en suspension (Fig. 2).

La végétation se distingue des autres éléments par son aspect éventuellement saisonnier (plantations à feuilles caduques) et par le fait que son efficacité dépend de la croissance de la plante. Par ailleurs, elle n'offre qu'une protection partielle : elle filtre la radiation plutôt qu'elle ne l'arrête (Fig. 1).

Lorsqu'on prévoit un ombrage au moyen de plantations, il faut qu'elles soient à feuilles caduques afin de profiter des apports d'énergie solaire en période hivernale et de protéger progressivement les parois transparentes à partir du printemps. Les plantations utilisées pourront être à tiges grimpantes ou retombantes, et on recherchera des feuillages denses pour une protection maximale en été, mais avec peu de branchage pour réduire l'ombrage au minimum en hiver. Cependant, des études ont montré que même en hiver, la plupart des arbres conservent un coefficient d'ombrage de près de 50 % de leur valeur d'été.

Les arbres sont également capables de filtrer ou de fixer les poussières, et d'absorber ou de produire de la vapeur d'eau. Un hectare de forêt peut produire près de 5 000 tonnes d'eau par an. Par photosynthèse, les arbres régénèrent l'air en produisant de l'oxygène. Dans les régions fortement boisées, les arbres interceptent de 60 à 90 % de la radiation solaire, empêchant ainsi l'augmentation des températures du sol. Ce phénomène sera permanent ou saisonnier selon qu'il s'agira d'espèces à feuillage caduc ou persistant. Par contre, les arbres diminuent la radiation nocturne vers la voûte céleste : le feuillage constitue un "ciel" pour le sol au pied de l'arbre et sa température radiante est supérieure à celle de la voûte céleste. La chute de température est donc limitée la nuit. D'ailleurs, on constate que les écarts de température au sol sont peu importants dans les régions boisées.

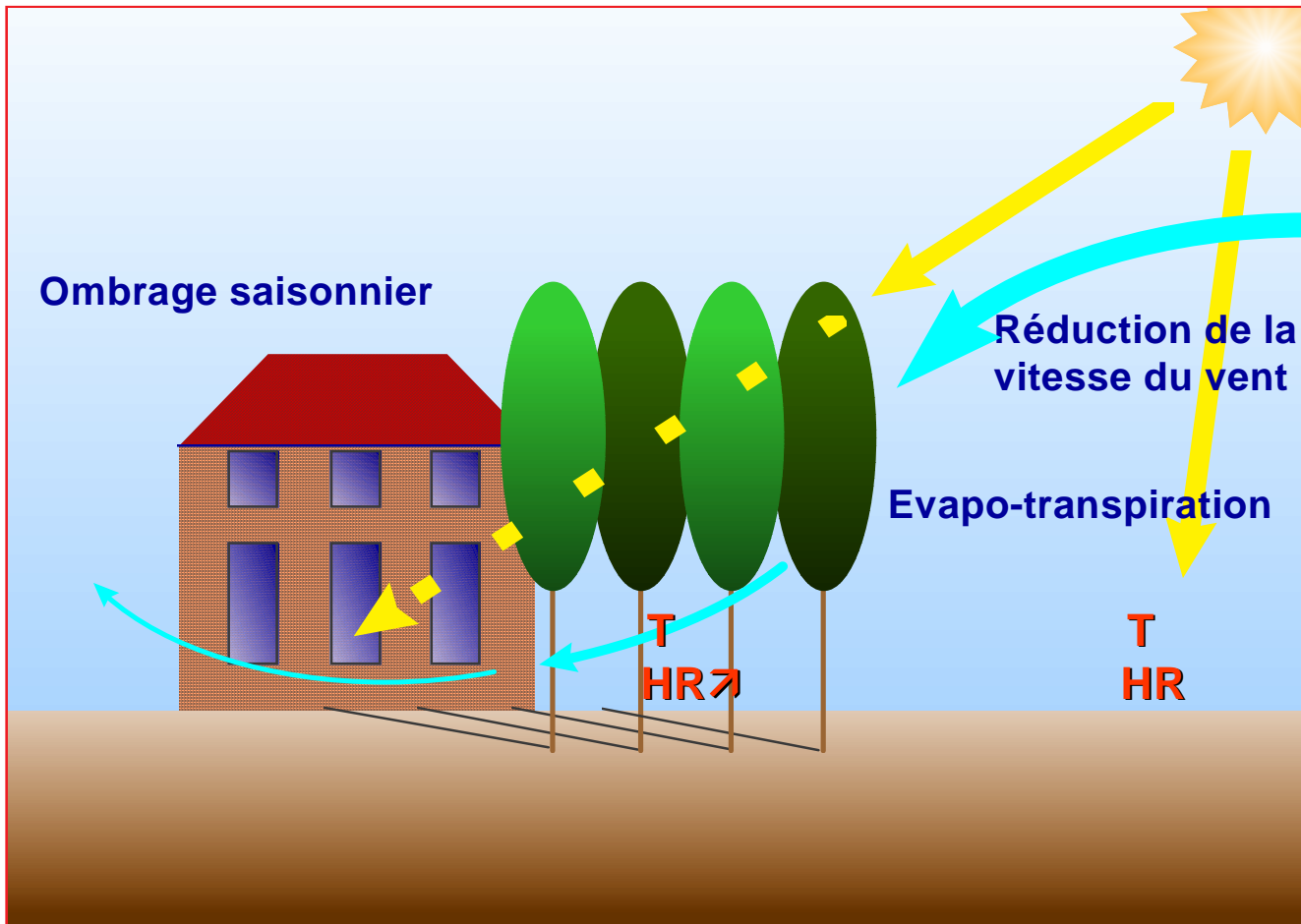
On remarque également une différence de température moyenne de 3,5 °C entre un centre-ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variant de 50 à 100 mètres. Une convection horizontale des masses froides (végétation) vers les masses plus chaudes (constructions voisines) permet ce rafraîchissement. De ce fait, l'humidité relative augmente de 5 %.

Enfin, la végétation offre une protection contre les vents forts. Haies, alignements d'arbres, essences grimpantes augmentent la rugosité à l'écoulement de l'air : la vitesse du vent est réduite et les déperditions par convection des bâtiments diminuent.

La végétation offre un ombrage saisonnier, fait écran contre les vents, rafraîchit l'air par évapo-transpiration et filtre les poussières en suspension.



Ombrage d'une allée par une treille à Anacapri (île de Capri).



2 La végétation se distingue des autres protections par son aspect saisonnier.

Les constructions masquent le rayonnement solaire, protègent du vent, stockent la chaleur et élèvent la température extérieure. Elles peuvent également créer des courants d'air ou réfléchir les rayons du soleil.

Les constructions constituent des écrans fixes pour leur voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on recherche une protection contre le soleil : c'est le cas des villes méditerranéennes traditionnelles, où l'étroitesse des ruelles et la hauteur des bâtiments réduisent considérablement le rayonnement direct et fournissent un ombrage bienvenu.

Ce rôle peut être négatif si les bâtiments voisins masquent le soleil alors qu'on souhaite bénéficier d'apports solaires. Dans le cas d'une conception solaire passive, il importe de mesurer l'impact de cet effet de masquage. On relève, sur un diagramme cylindrique ou stéréographique (Fig. 2) les courbes de la course solaire annuelle et la silhouette des bâtiments voisins. En se plaçant au droit des fenêtres de chaque face du bâtiment, on relève l'angle en deçà duquel le rayonnement direct disparaît derrière les bâtiments opposés. On repère ainsi facilement les périodes où l'ensoleillement est disponible et on peut calculer les facteurs de réduction des gains solaires.

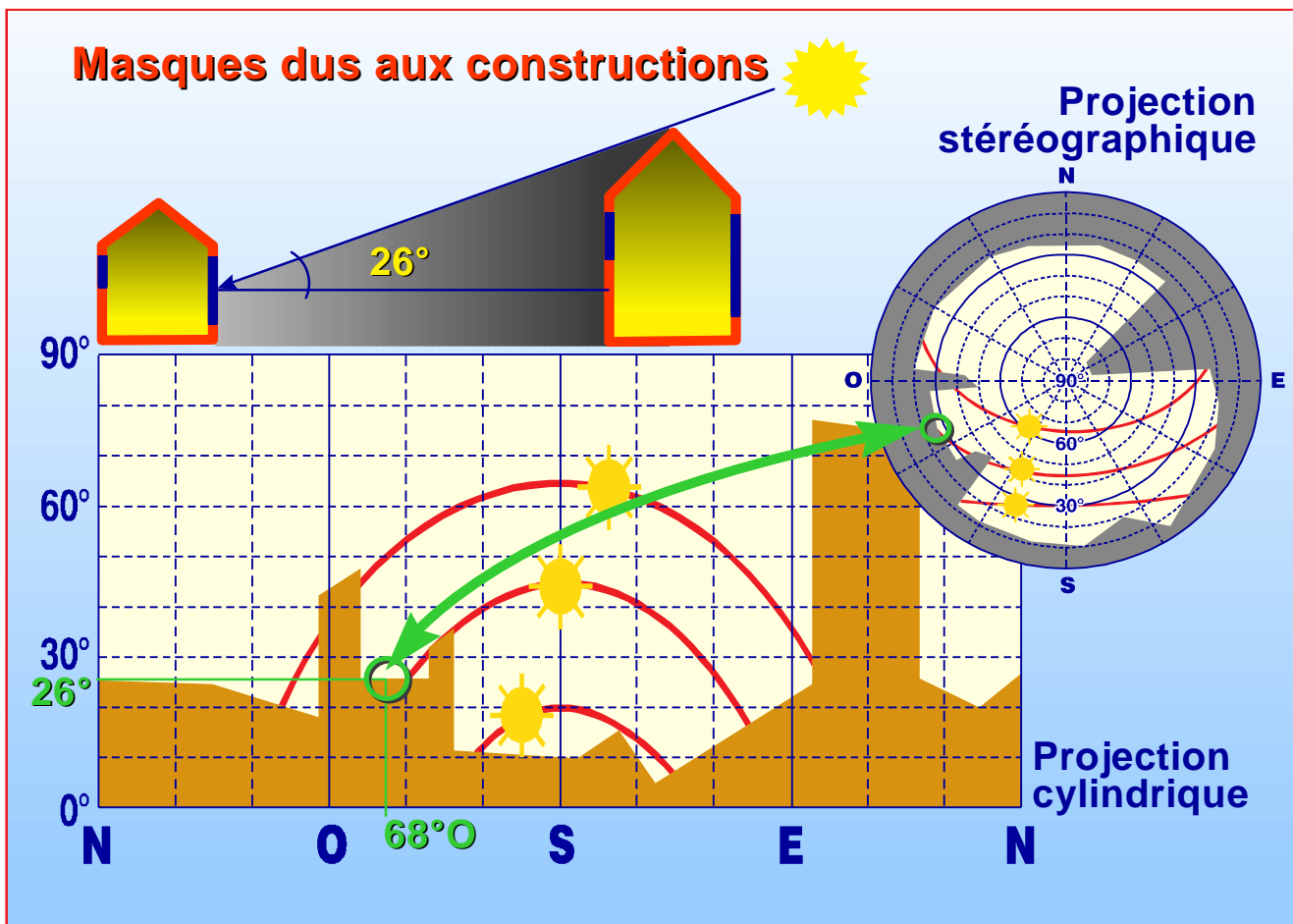
La nature des surfaces construites influencent également le microclimat en stockant la chaleur. En milieu urbain, la température moyenne est supérieure de quelques degrés à la température moyenne en rase campagne. La construction des sols empêche également l'eau de percoler vers le sous-sol. Enfin, les constructions peuvent générer des situations paradoxales. Elles réduisent la vitesse moyenne des vents tout en forçant ceux-ci à les contourner, ce qui multiplie les turbulences. Les tours sont d'ailleurs connues pour générer de violentes bourrasques à leur base.

L'emploi de matériaux réfléchissants (vitrages) peut également influencer l'exposition effective d'un bâtiment (Fig. 1). Un édifice orienté au nord et doté de larges vitrages clairs pour tirer parti de la lumière naturelle peut se retrouver dans une situation sud si on construit en face un bâtiment équipé de vitrages réfléchissants, précisément pour se protéger de l'ensoleillement. A l'évidence, les conditions de confort, dans le premier bâtiment, sont profondément modifiées par la construction du second.

Les constructions masquent le rayonnement solaire, protègent du vent, stockent la chaleur et élèvent la température extérieure. Paradoxalement, elles créent des courants d'air ou réfléchissent les rayons du soleil.



Les apports solaires d'un bâtiment peuvent se trouver modifiés si le voisin construit ceci...



2 Détermination de l'effet de masquage du soleil par projection cylindrique et stéréographique.

Les climats dits tempérés regroupent une grande variété de climats locaux. Oslo, Marseille ou Athènes ne connaissent ni les mêmes températures, ni le même ensoleillement, ni les mêmes précipitations. Il est par conséquent nécessaire d'étudier avec intelligence le climat local, enregistré par les observatoires météorologiques. La construction traditionnelle, c'est-à-dire avant l'apparition des matériaux isolants, a privilégié deux types de systèmes constructifs : construction massive en pierre ou en briques (forte inertie) et construction légère en bois (faible inertie).

Avec l'apparition des isolants, la situation est devenue plus complexe : l'ambiance intérieure peut à présent être plus ou moins découplée des conditions climatiques extérieures. Le confort est désormais assuré par la réduction des déperditions thermiques dues à l'isolation. La construction massive est exposée au rayonnement solaire pour accumuler la chaleur le jour et la restituer la nuit. La capacité thermique importante des murs permet de garder la fraîcheur à l'intérieur la journée et de limiter la chute des températures la nuit : phénomène de déphasage (Fig. 2). Or, les climats tempérés se caractérisent par des écarts journaliers de températures inférieurs ou égaux à 10 °C : l'intérêt du déphasage y est donc réduit. Cependant, les températures extérieures moyennes étant constamment en dessous des températures de confort, il existe une véritable saison de chauffe et donc nécessité d'emmagasiner de la chaleur autrement que par l'effet de masse des murs extérieurs.

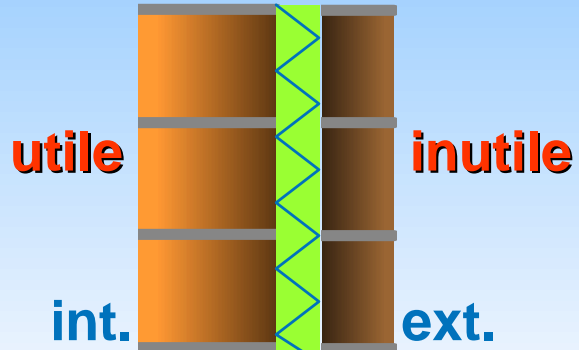
Le confort intérieur dans le cas d'une architecture solaire passive n'est pas déterminé uniquement par la température mais aussi par les valeurs de l'insolation directe ou indirecte. Cette donnée varie très fortement dans le temps et représente un apport statistiquement non négligeable. Dans une construction isolée, seule la masse située du côté intérieur de l'enveloppe isolante contribue à une inertie utile (Fig. 1).

Les constructions en bois fonctionnent différemment : peu conducteur de la chaleur, le bois s'échauffe et se refroidit vite. Il offre un contact chaleureux qui évite la sensation inconfortable de paroi froide (Fig. 2). Associé à de grandes surfaces vitrées, ce type de construction est souvent victime de surchauffes. Par contre, du point de vue de la construction, les ossatures bois permettent facilement d'intégrer un haut niveau d'isolation. A ce titre, elles sont fréquemment utilisées dans les climats rigoureux (Scandinavie) ou associées à un système de climatisation qui permet de réguler les surchauffes (Amérique du Nord).

L'inertie constructive intervient sur les consommations de chauffage (réduction des consommations dans le cas d'une occupation prolongée) et les surchauffes (une partie de la chaleur est stockée pour être restituée ultérieurement). En tout état de cause, une conception basée sur l'utilisation des gains solaires directs, en climats tempérés, doit opter pour un niveau d'inertie important.

La capacité thermique d'une paroi n'est utile en climat tempéré que si elle est placée du côté intérieur du bâtiment et isolée des conditions climatiques extérieures.

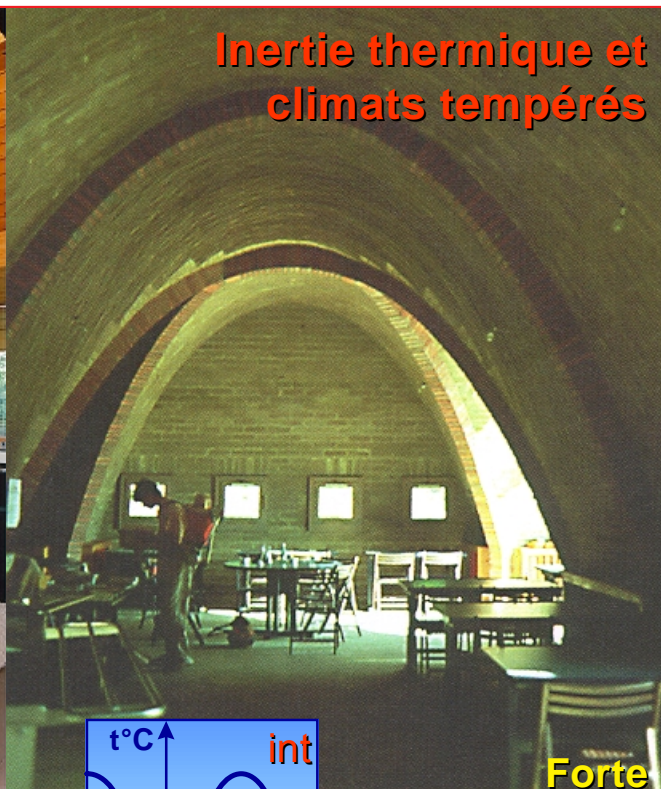
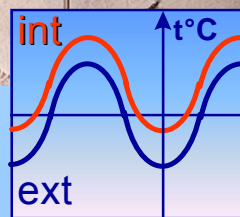
Capacité thermique



L'isolation distingue la capacité thermique utile (à l'intérieur) de la capacité inutile (à l'extérieur).

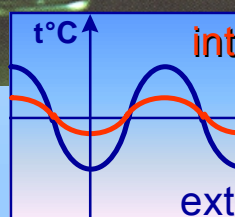


Faible capacité thermique
 ΔT augmente



Inertie thermique et climats tempérés

Forte capacité thermique
 ΔT diminue



2 La capacité thermique détermine l'évolution des températures intérieures en relation aux températures extérieures.

Parce que la matière a une certaine capacité à accumuler la chaleur, le choix des matériaux permet, dans une certaine mesure, d'adapter le bâtiment aux variations du climat local.

Les climats chauds et secs se rencontrent principalement au Proche-Orient, en Afrique du Nord, en Australie et dans l'Ouest américain. Ces quatre régions du monde ont chacune une culture particulière et un art de construire différent. Il semble opportun, ici, de se pencher sur les traditions constructives du Proche-Orient pour voir comment l'habitat vernaculaire intègre la dimension climatique.

Nous prenons pour référence les données climatiques d'une ville telle que Bagdad (Fig. 2). Il est important de remarquer que si les températures sont élevées la journée, elles sont, par contre, relativement fraîches la nuit. L'écart jour / nuit est important ($\Delta T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, effet de contraste), surtout en saison chaude. En saison froide, les températures moyennes restent inférieures aux températures de confort.

Pendant les chaleurs excessives de mai à octobre, il faut des murs épais pour protéger l'intérieur des habitats. Mais ces murs emmagasinent la chaleur et rend l'intérieur des habitations trop chaud la nuit pour y dormir. Les nuits se passent généralement à l'air libre. En saison froide, l'ambiance intérieure pourra être améliorée grâce au volant thermique assuré par les murs épais et à la pénétration des rayons solaires à travers les fenêtres ouvertes à midi.

Le rayonnement solaire est la principale source de chaleur en climat chaud et sec. La chaleur se transmet principalement par conduction de la chaleur absorbée par les murs et toitures. La vitesse de ce phénomène dépend de la nature du matériau (conductivité thermique) et de l'état de surface du matériau (couleur et texture).

Pour ce type de climat, il est donc sage de prévoir des murs massifs et des toitures lourdes afin d'atténuer les effets des forts écarts journaliers de température, ce qui aura pour effet de maintenir une certaine fraîcheur le jour tout en emmagasinant de la chaleur pour les nuits plus fraîches. Il faut également prévoir des parements de murs extérieurs qui réfléchissent les radiations solaires et s'opposent ainsi à l'échauffement des murs en question.

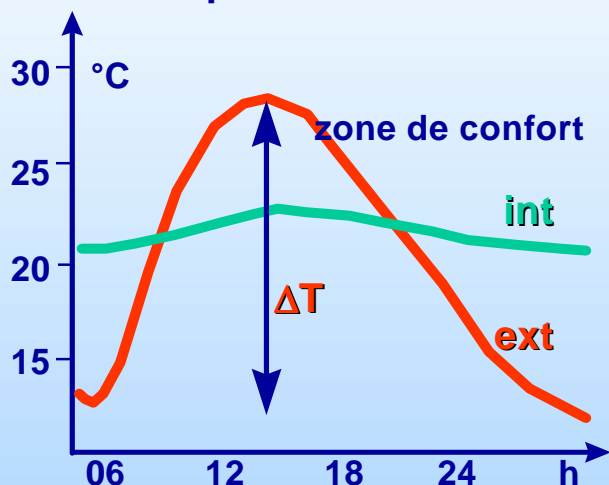
La figure 2 montre que, pour une surface peinte en blanc, 3 % seulement de l'énergie incidente servent à réchauffer la masse de la paroi. En effet, 90 % du rayonnement absorbé, représentant 30 % du rayonnement incident, est réémis à l'extérieur. A gauche, le graphique montre l'atténuation des effets des écarts journaliers de température grâce à une construction massive. La courbe rouge représente l'évolution journalière des températures extérieures (amplitude $15\text{ }^{\circ}\text{C}$) et la courbe verte, celle des températures intérieures qui se maintiennent dans la zone de confort (amplitude $3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Des murs massifs et des toitures lourdes atténuent l'effet des écarts journaliers de température. Ils maintiennent une certaine fraîcheur le jour tout en accumulant la chaleur pour la restituer la nuit.

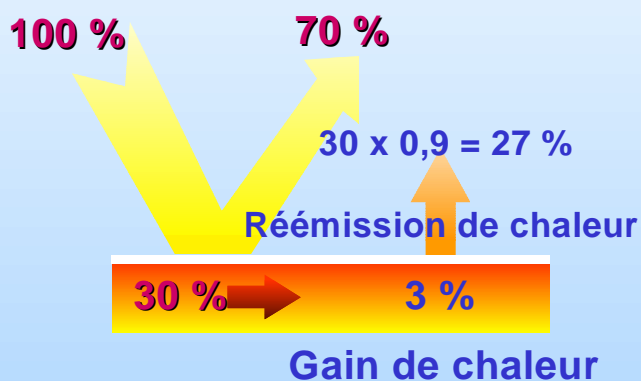


Ombrage et enduit blanc sur construction massive en climat chaud et sec (Tunisie). 1

Atténuation des écarts de température



Inertie thermique et climats chauds et secs



Année type (°C)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T _{moy max}	16	18,5	22	29	36	41	43,5	43,5	40	34	24,5	17,5
T _{moy min}	4	5,5	9	14,5	20	23,5	25	24,5	21	16	10,5	5
ΔT moyen	12	13	13	14,5	16	17,5	18,5	19	19	18	14	12,5
HR _{moy} (%)	68,5	59,5	54,5	47,5	32	23,5	22	23,5	26,5	35,5	53	70
Précipitations (mm)	24	25	28	15	7	0	0	0	0	2	3	3

2 Données climatiques représentatives d'un climat chaud et sec. Atténuation des écarts de température. Effet des parements clairs.

Les climats chauds et humides se rencontrent principalement en Afrique centrale, en Asie, au nord de l'Australie et en Amérique latine. Ces types de climats sont certainement ceux pour lesquels il est le plus difficile d'aboutir à une architecture passive confortable. Les niveaux de confort attendus aujourd'hui par l'occupant ne permettent plus, sous ces climats, d'adopter des solutions de type vernaculaire.

Nous prenons pour référence les données climatiques d'une ville sud-américaine telle que Cayenne en Guyane (Fig. 2). Son climat est représentatif des régions équatoriales caractérisées par une chaleur humide, de fortes précipitations, un haut degré hygrométrique allant de pair avec un écart journalier de température inférieur à 10 °C et une température élevée assez uniforme tout au long de l'année. Un tel climat est trop chaud pour le confort diurne et celui de la plupart des nuits. En effet, on situe la zone de confort diurne entre 18 et 24 °C et la zone de confort nocturne entre 12 et 18 °C (Tables de Mahoney). Il n'y a donc aucune raison de privilégier une construction qui puisse emmagasiner la chaleur en journée pour la restituer la nuit puisque les nuits sont presque aussi chaudes que les jours. Au contraire, l'emploi de matériaux lourds à forte inertie thermique exposés au soleil la journée rendrait les nuits encore plus inconfortables. La circulation d'air apparaît donc comme le facteur essentiel permettant de diminuer l'inconfort résultant du climat.

Dans un tel climat, les bâtiments doivent être orientés selon un axe longitudinal est-ouest afin de réduire l'exposition des façades au soleil. De plus, on prévoira des baies aussi larges que possible pour que les vents dominants puissent pénétrer dans les bâtiments (Fig. 1). Un vide d'air ou des matériaux légers isolants en toiture permettront à cette dernière d'être ventilée sans oublier pour autant une bonne résistance aux importantes précipitations. Par ailleurs, le rayonnement solaire est la principale source de chaleur et doit être évité.

Des recherches récentes menées en Australie ont permis de mettre en évidence que le problème de la masse thermique est plus complexe aujourd'hui : l'introduction des matériaux isolants découple la masse thermique de l'exposition solaire. Une série de simulations (Fig. 2) a permis de constater que les constructions massives peuvent présenter à la fois les meilleurs et les pires résultats. Les facteurs critiques sont en fait le taux de ventilation (il doit être élevé, pour dissiper les apports solaires et les gains internes) et l'exposition des fenêtres (elles doivent être à l'abri du soleil, de préférence au nord ou au sud). L'isolation n'est intéressante que si elle est couplée à une ventilation importante (sinon les apports solaires et internes s'accumulent à l'intérieur) et si l'ombrage et l'orientation des fenêtres sont corrects (N ou S).

La figure 2 reproduit 2 cas parmi les 2 268 examinés. Le premier représente une construction légère (sol en charpente sur vide ventilé, murs en structure bois isolé et toit en tuile isolé) et le second une construction lourde (sol en béton sur terre plain, murs en briques isolés par l'extérieur, toit en tuile isolé). L'axe vertical mesure en degrés-heures le produit du nombre d'heure où la température intérieure est supérieure à la température de confort et le nombre de degrés d'écart : c'est donc une mesure de la surchauffe. L'influence déterminante de l'ombrage (colonnes 3 et 4) et de la ventilation (colonnes 2 et 4) apparaît clairement.

En climat chaud et humide, le confort peut être assuré par une construction isolée massive ou légère, pour autant que la ventilation soit élevée et que les fenêtres soient bien orientées et ombragées.

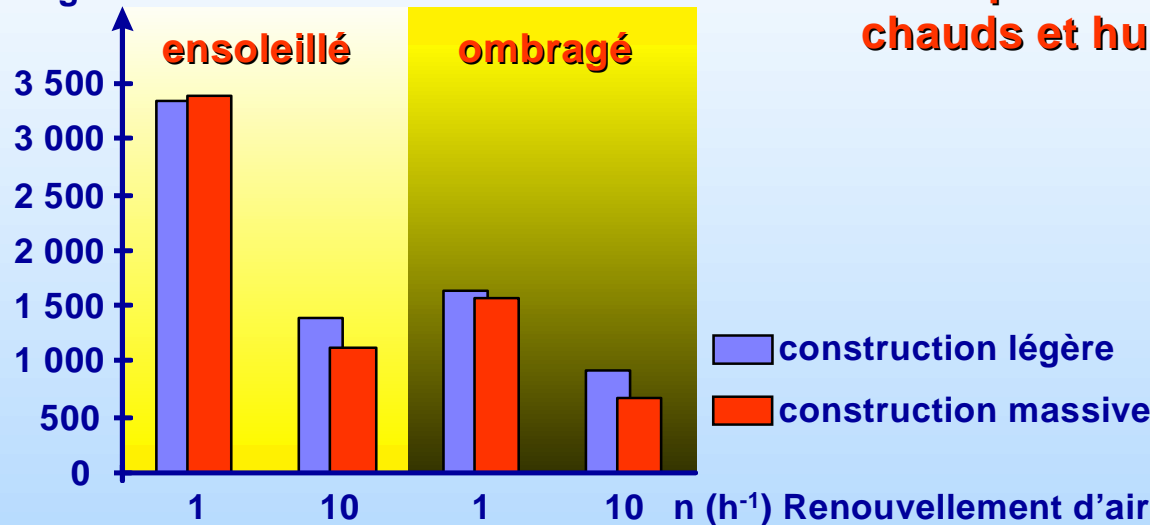


La protection solaire et la ventilation sont les premiers garants du confort, Bali, Indonésie (arch. P. Muller).

1

Degré-heure de surchauffe

Inertie thermique et climats chauds et humides



Année type (°C)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T _{moy max}	31	30	30	31	32	32	32	32	32	32	32	32
T _{moy min}	23	23	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22
ΔT moyen	8	7	7	8	9	9	10	10	10	10	10	10
HR _{moy} (%)	92	93	94	95	93	90	90	89	90	90	88	91
Précipitations (mm)	334	422	455	397	278	196	149	117	120	106	94	205

2 Données climatiques représentatives d'un climat chaud et humide. Comparaison entre construction légère et construction lourde.

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de 36,7 °C. Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu.

La figure 1 considère le sentiment de confort thermique tel qu'il est exprimé par les sujets eux-mêmes. Il s'agit de pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD), exprimés sur l'axe vertical, pour des personnes au repos en position assise ou effectuant un travail léger. Il est impossible de définir une température qui convienne à tous : il reste au mieux 5 % d'insatisfaits. La courbe représentant le travail léger glisse vers les basses températures : les personnes ayant plus de chaleur à perdre préfèrent des températures plus basses. Par contre, la courbe des sujets au repos est plus resserrée : ces personnes sont plus sensibles à de faibles variations de température.

La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes : plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau). Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %). Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

Le confort thermique dépend de 6 paramètres (Fig. 2) :

1. Le métabolisme est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C. Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

2. L'habillement représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

3. La température ambiante de l'air T_a .

4. La température des parois T_p .

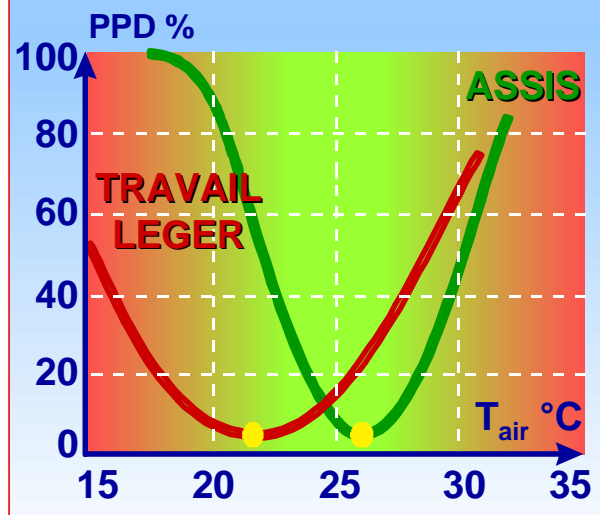
De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie (appelée aussi température résultante sèche) : $T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$.

5. L'humidité relative de l'air (HR) est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température T_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.

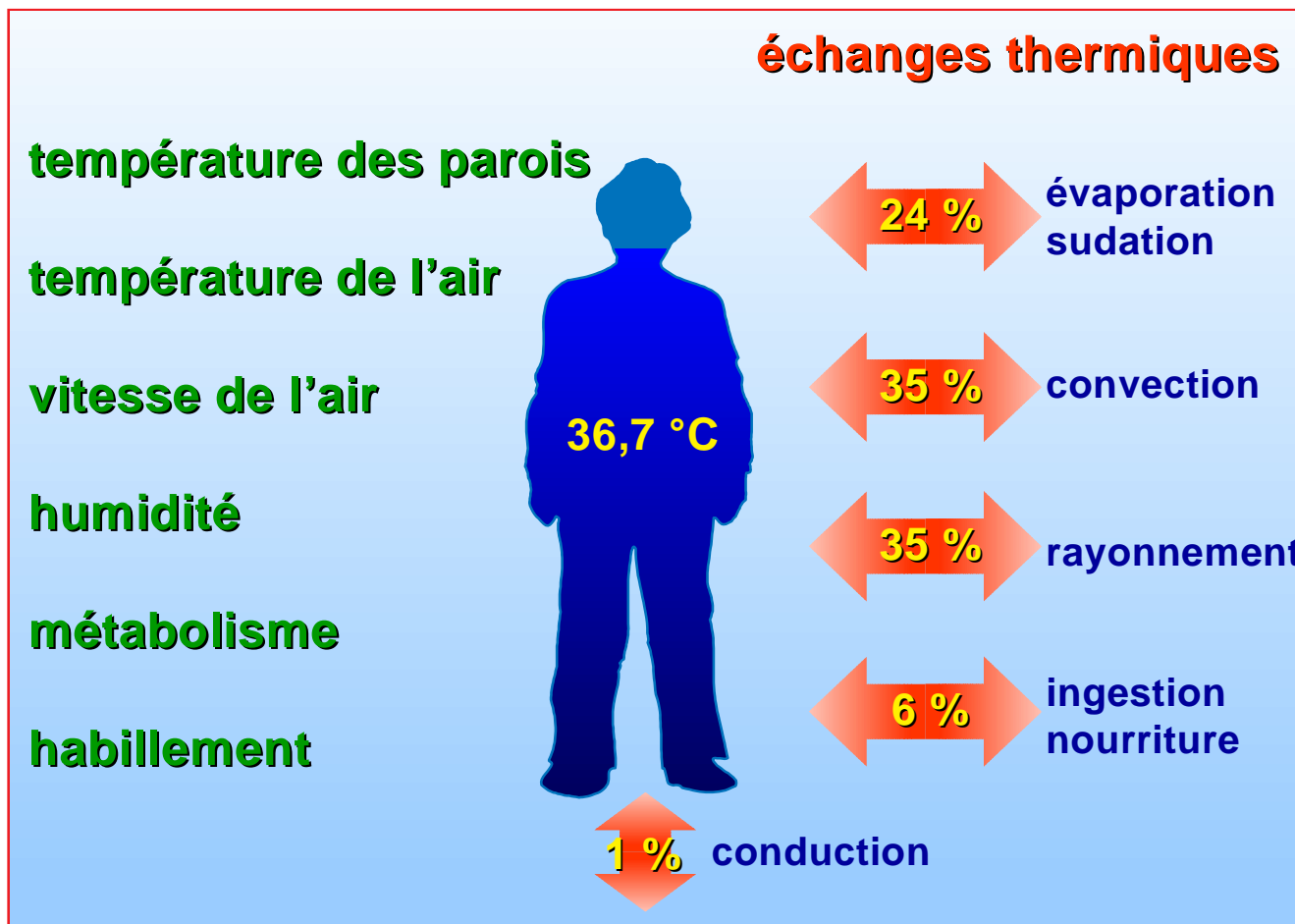
6. La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection. Dans l'habitat, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s.

Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est la plage de confort thermique.

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement.



1 Pourcentage prévisible d'insatisfaits : température de confort pour deux activités différentes.



2 Les pertes thermiques du corps humain dépendent de 6 paramètres physiques.

La température des parois T_p influence les échanges thermiques par rayonnement. La répartition des températures sur une paroi est un phénomène complexe mais on admet que T_p est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface.

De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie, dite encore température opérative ou température résultante sèche :

$$T_{rs} = (T_a + T_p) / 2.$$

T_a représentant la température ambiante ou température sèche, mesurée par un thermomètre ordinaire.

Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est la plage de confort thermique. Ainsi, dans une situation donnée, la température opérative peut varier dans une certaine mesure autour de la température de confort thermique sans que le niveau de confort de l'individu ne soit modifié.

La figure 1 rappelle les températures de confort en fonction de l'activité mesurée par la production de chaleur métabolique, pour une tenue d'intérieur d'hiver (pantalons, chemise et pull-over à manches longues, chaussettes épaisses et chaussures), une vitesse de l'air de 0,4 m/s et une humidité relative de 50 %.

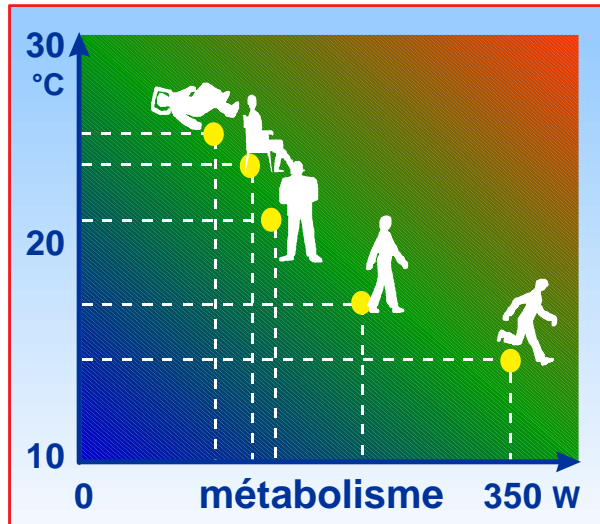
Certaines études ont fourni une base scientifique permettant une réglementation des conditions de confort des lieux de travail. Par exemple, la réglementation pour la Protection du Travail impose des températures de l'air minimum - maximum en fonction du travail effectué, c'est-à-dire du métabolisme, pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %.

La figure 2 illustre la notion de température résultante sèche (température de confort) telle que définie plus haut. Pour une paroi non isolée (à gauche), la température de surface est basse : 12 °C. Pour une température de l'air ambiant de 20 °C, la température résultante sera donc de 16 °C, soit une température inconfortable : c'est l'effet dit "de paroi froide". Le corps perd de la chaleur en direction des sources froides.

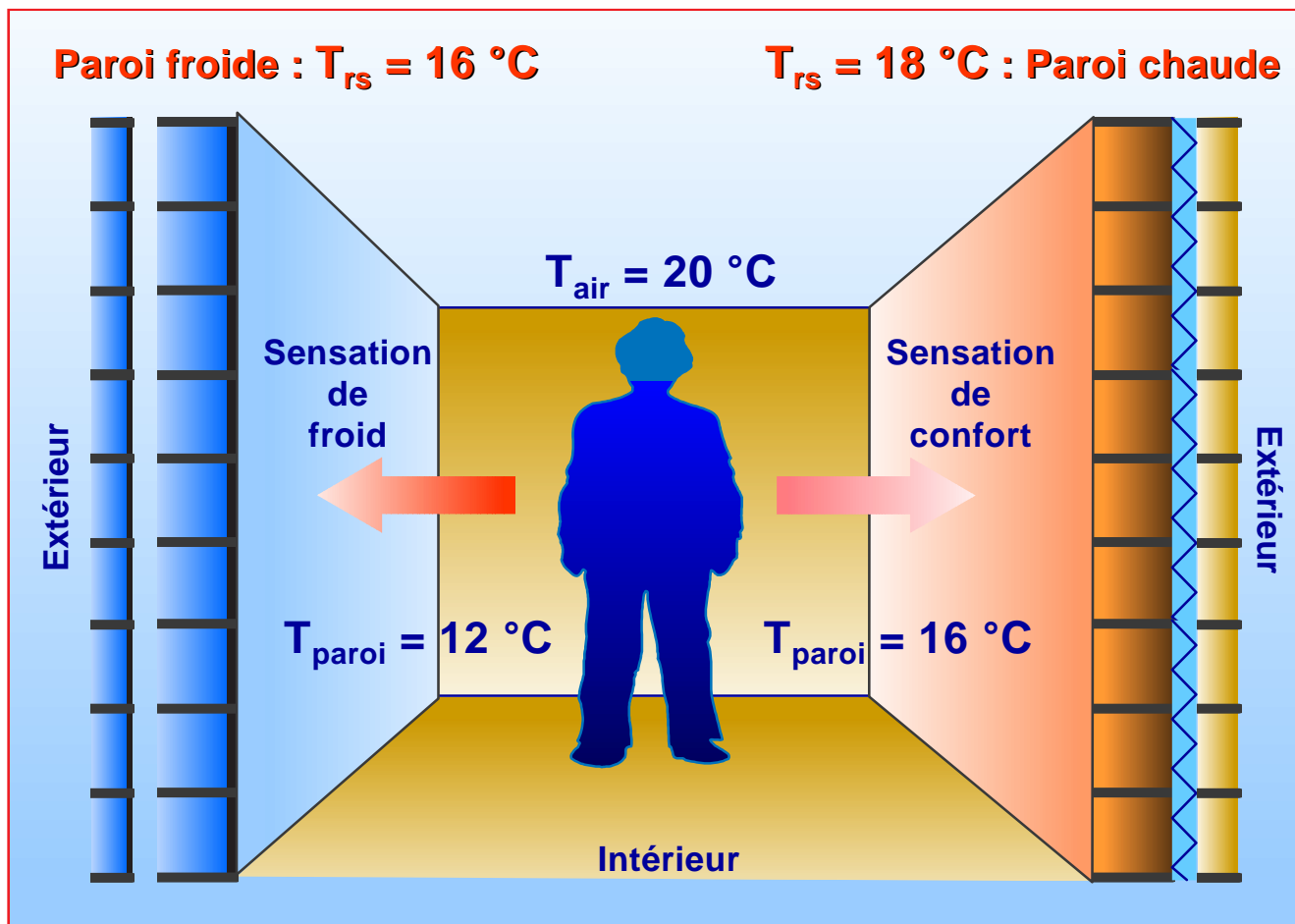
Pour une paroi isolée (paroi de droite), la température de surface est égale à 16 °C et la température résultante augmente jusqu'à 18 °C. La température des parois étant toujours inférieure à celle du corps, ce dernier continue à perdre de la chaleur mais en moindre quantité, lui permettant d'atteindre un état de confort.

Dans une situation donnée, la température peut varier autour de la température de confort T_{rs} sans que le niveau de confort thermique de l'individu ne soit modifié.

$$T_{rs} = (T_a + T_p) / 2$$



Températures de confort pour différentes activités (d'après O. Fanger). 1



2 La température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois.

Entre 30 % et 70 %, l'humidité relative pèse peu sur la sensation de confort thermique. Dans nos régions, la variation de la température de confort en fonction de l'humidité relative est inférieure à 1 °C.

Les activités de l'homme - dormir, se laver, préparer les repas, nettoyer - entraînent une production de vapeur d'eau pouvant atteindre 10 à 14 litres par jour dans une habitation moyenne. Cette production de vapeur d'eau à l'intérieur des habitations contribue à y maintenir une humidité relative élevée. Par conséquent, il est souvent nécessaire de la limiter pour éviter les problèmes de condensation superficielle. Cette limitation peut s'effectuer grâce à une meilleure isolation (température de surface plus élevée), par une meilleure ventilation (l'air humide est remplacé par de l'air plus sec) ou en chauffant davantage (augmentation de la température de rosée).

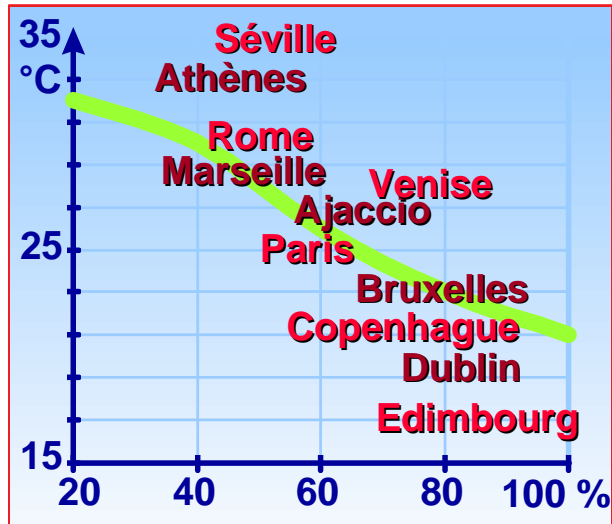
L'air ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. En ambiance chaude, dans des conditions de température données, les échanges thermiques du corps avec son environnement ont lieu principalement par évaporation à la surface de la peau. Aussi, dans une ambiance saturée où il n'est plus possible de transpirer, le corps est la plupart du temps en position d'inconfort. A l'inverse, dans une ambiance sèche, la transpiration est facilitée et permet de supporter des températures ambiantes plus élevées.

La courbe de la figure 1 représente le lieu des températures de confort en fonction des humidités relatives pour un sujet nu. Les températures sont valables pour une activité physique moyenne (150 W) et des températures humides de 20 °C. La corrélation entre l'humidité relative et la diminution des températures de confort vers le point de saturation apparaît clairement. Plusieurs villes sont positionnées de part et d'autre de la courbe en fonction de leurs conditions climatiques moyennes au mois de juillet (T° et HR).

La figure 2 représente un diagramme de confort thermique dans le cas d'une activité légère en position assise, en tenue d'intérieur d'hiver et pour une vitesse de l'air $v = 0,2$ m/s. La différence entre la température de l'air et la température moyenne de surface des parois est de 1 °C et l'humidité relative varie entre 30 et 70 %. L'échelle verticale gauche mesure la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide en Pascal (Pa). L'échelle verticale droite mesure l'humidité absolue de l'air humide en quantité d'eau exprimée en gramme par kg d'air sec pour une température donnée (g/kg air sec). L'échelle horizontale indique les températures de l'air. Les courbes rouges représentent le lieu des points de même humidité relative. Au-delà de la courbe de saturation HR = 100 % apparaît le phénomène de condensation.

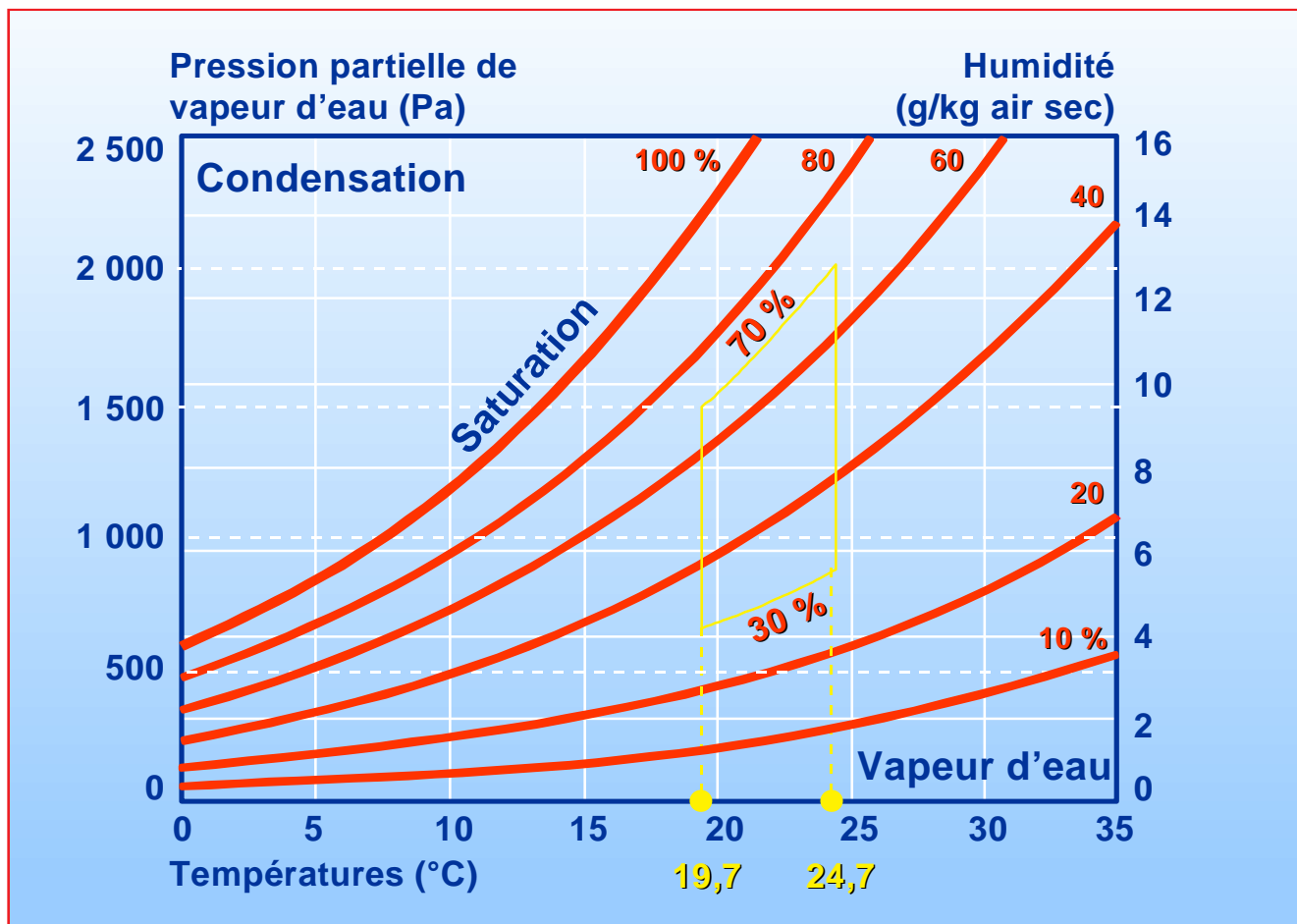
Entre 30 % et 70 %, l'humidité relative pèse peu sur la sensation de confort thermique.

Un adulte exerçant une activité légère rejette sous forme de vapeur environ 50 g d'eau par heure.



Ligne des températures de confort pour un sujet nu, en fonction de l'humidité relative, d'après O. Fanger.

1



2 Plage de confort pour une activité de bureau.

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s : c'est en effet à partir de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu moyen.

La figure 1 met en relation la vitesse de l'air et la sensation de confort. Les courbes représentent les températures de confort déterminées statistiquement pour différents niveaux d'activité, une tenue d'intérieur d'hiver et une humidité relative de 50 %. Les températures de confort varient d'environ 3 °C autour des vitesses de l'air comprises entre 0,1 et 0,3 m/s, c'est-à-dire autour du seuil de perception des courants d'air, alors qu'elle est réduite tant pour les vitesses inférieures à 0,1 m/s qu'au-delà de 0,5 m/s. Cette figure illustre donc particulièrement bien la sensibilité du corps aux courants d'air.

Il n'est pas difficile d'assurer le confort thermique d'individus normalement habillés même en situation de courant d'air important (vitesse supérieure à 1 m/s) si la température ambiante correspond à la température de confort. L'inconfort éventuellement ressenti provient du fait que seule une partie du corps est soumise à des pertes de chaleur par convection forcée. Assurer des conditions de confort consiste donc à réduire les vitesses de l'air en deçà du seuil de perception des courants d'air ou encore à uniformiser les conditions de mouvement de l'air.

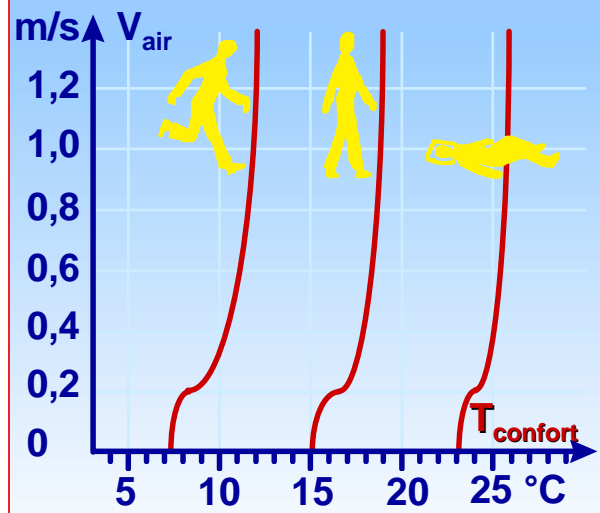
Les courants d'air peuvent agir positivement sur le confort dans une ambiance chaude et humide. En effet, le corps ne perd que peu de chaleur par rayonnement, conduction et convection libre car les températures ambiantes sont élevées et il se rafraîchit peu par transpiration car l'humidité relative de l'air est aussi élevée. Par conséquent, les courants d'air offrent une source de déperditions de chaleur supplémentaire par convection forcée.

En règle générale, l'air extérieur s'introduit dans les bâtiments par l'effet volontaire de la ventilation ou par infiltration au droit des défauts d'étanchéité de l'enveloppe. Les techniques de ventilation des bâtiments déterminent la section des conduits, et donc la vitesse de l'air, de manière à assurer le débit des quantités d'air nécessaires tout en respectant le confort de l'occupant.

Par contre, l'infiltration de l'air dans un bâtiment dépend de la qualité d'exécution de celui-ci et est susceptible de produire des situations d'inconfort dès qu'un défaut d'exécution est responsable de courants d'air. Ces infiltrations s'observent souvent dans certains détails de construction et sont dues à des différences de pression engendrées soit par le vent, soit par l'écart de température de part et d'autre de l'enveloppe extérieure.

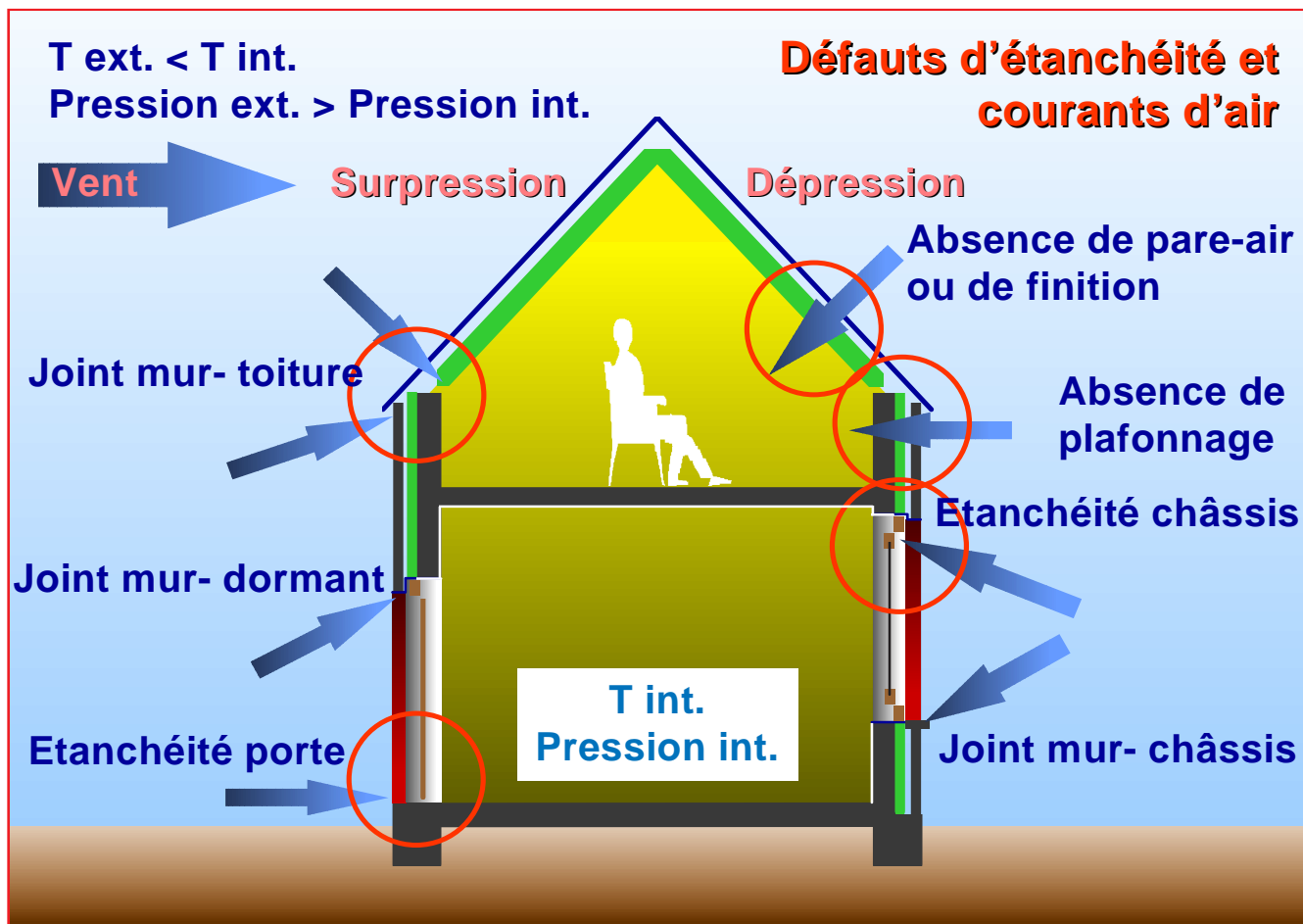
La figure 2 illustre les problèmes d'infiltrations qui sont particulièrement importants ($\pm 20\%$) au droit des portes et des fenêtres, mais aussi aux raccords de toiture, en l'absence d'un pare-air ou d'un pare-vapeur, ou au droit des murs non plafonnés.

La vitesse de l'air détermine les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Elle influence le confort dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s.



Températures de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen, d'après O. Fanger.

1



2 Les défauts d'étanchéité des bâtiments sont des sources de courants d'air inconfortables.

Au confort d'hiver répond la stratégie du chaud : capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment.

- Capturer :

Capter la chaleur consiste à recueillir l'énergie solaire et à la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment dépend du climat et de ses variations journalières et saisonnières, mais aussi de l'orientation du bâtiment, de la nature de ses surfaces et de ses matériaux, de la topographie du lieu, de l'ombrage, etc. Le rayonnement solaire n'est pratiquement utilisable qu'au droit des surfaces vitrées, où il est partiellement transmis à l'ambiance intérieure et fournit un gain direct de chaleur.

- Stocker :

Le rayonnement solaire produit souvent de la chaleur au moment où elle n'est pas nécessaire. Il est alors intéressant de pouvoir stocker cette énergie jusqu'au moment où ce besoin se fait sentir. Ce stockage a lieu au sein de chaque matériau suivant sa capacité d'accumulation et permet ainsi d'absorber la chaleur et d'atténuer les fluctuations de température dans le bâtiment en tirant parti de son inertie.

- Conserver :

En climat froid ou frais, on s'efforcera de conserver toute chaleur, qu'elle découle de l'ensoleillement, d'apports internes ou du système de chauffage. C'est essentiellement la forme et l'étanchéité de l'enveloppe ainsi que les vertus isolantes de ses parois qui limiteront les déperditions thermiques du bâtiment. Cloisonner les espaces en différentes zones permettant de créer des ambiances thermiques différenciées (températures de consignes différentes ou zones tampons), orientées suivant leur utilisation, permet aussi de répartir au mieux la charge de chauffage.

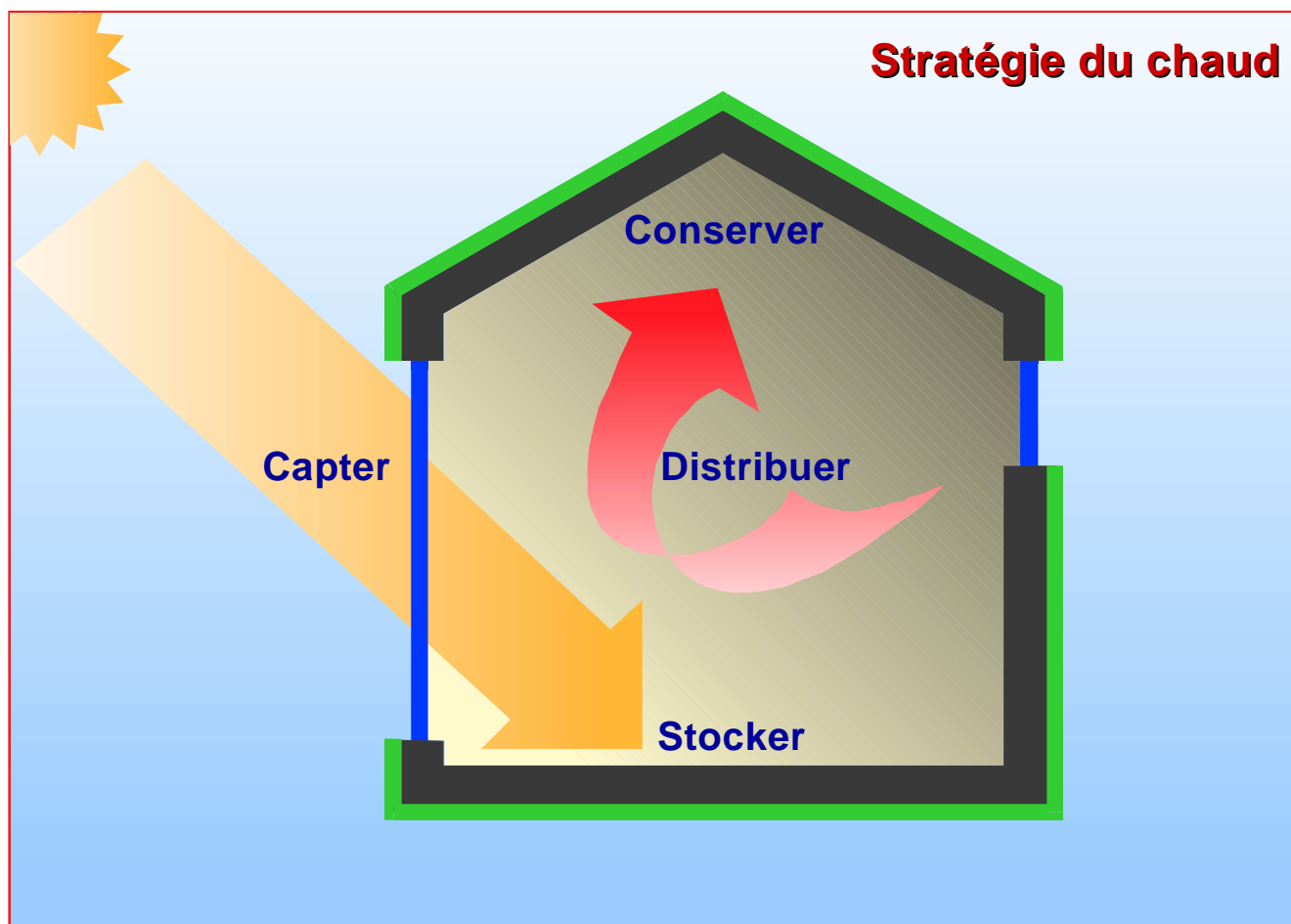
- Distribuer :

Distribuer la chaleur dans le bâtiment tout en la régulant consiste à la conduire dans les différents lieux de vie où elle est souhaitable. Cette distribution peut s'effectuer naturellement lorsque la chaleur accumulée dans un matériau durant la période d'ensoleillement est restituée à l'air ambiant par rayonnement et convection. Un autre mode de distribution de la chaleur est celui de la thermocirculation de l'air (migration naturelle des masses d'air chaud vers le haut). Enfin, cette distribution peut être assurée par un circuit de ventilation forcée. La chaleur doit également être régulée en fonction des différentes pièces de l'habitation et de leur utilisation.

Au confort d'hiver répond la stratégie du chaud : capter la chaleur du rayonnement solaire, la stocker dans la masse, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment tout en la régulant.



Des espaces largement ouverts au soleil 1
(arch. M. Gerber).



2 Les principes du confort d'hiver.

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement.

- Protéger :

Protéger le bâtiment, et particulièrement ses ouvertures, de l'ensoleillement direct afin de limiter les gains directs revient à ériger des écrans, extérieurs si possible, qui le mette à l'ombre. Ces écrans peuvent être permanents, amovibles ou saisonniers (végétation). Par ailleurs, afin d'éviter l'échauffement du bâtiment au droit des parois opaques, un niveau d'isolation suffisant doit empêcher la chaleur de s'accumuler dans la masse. En climat chaud, il faut particulièrement veiller à éviter les apports de chaleur provenant des parois et des toitures échauffées par le soleil. On y parvient en accroissant leur isolation ou leur inertie, en offrant des surfaces réfléchissantes au soleil ou encore en limitant les infiltrations d'air chaud dans le bâtiment.

- Minimiser les apports internes :

Minimiser les apports internes vise à éviter une surchauffe des locaux due aux occupants et aux équipements : l'éclairage artificiel, l'équipement électrique, la densité d'occupation des locaux, etc. Certains apports peuvent être facilement minimisés en favorisant, par exemple, l'éclairage naturel.

- Dissiper les surchauffes :

La dissipation des surchauffes peut être réalisée grâce à la ventilation naturelle, en exploitant les gradients de température par le biais d'exutoires produisant un "effet de cheminée". La pression du vent et la canalisation des flux d'air peuvent également être mises à profit pour évacuer l'air surchauffé du bâtiment.

- Refroidir les locaux :

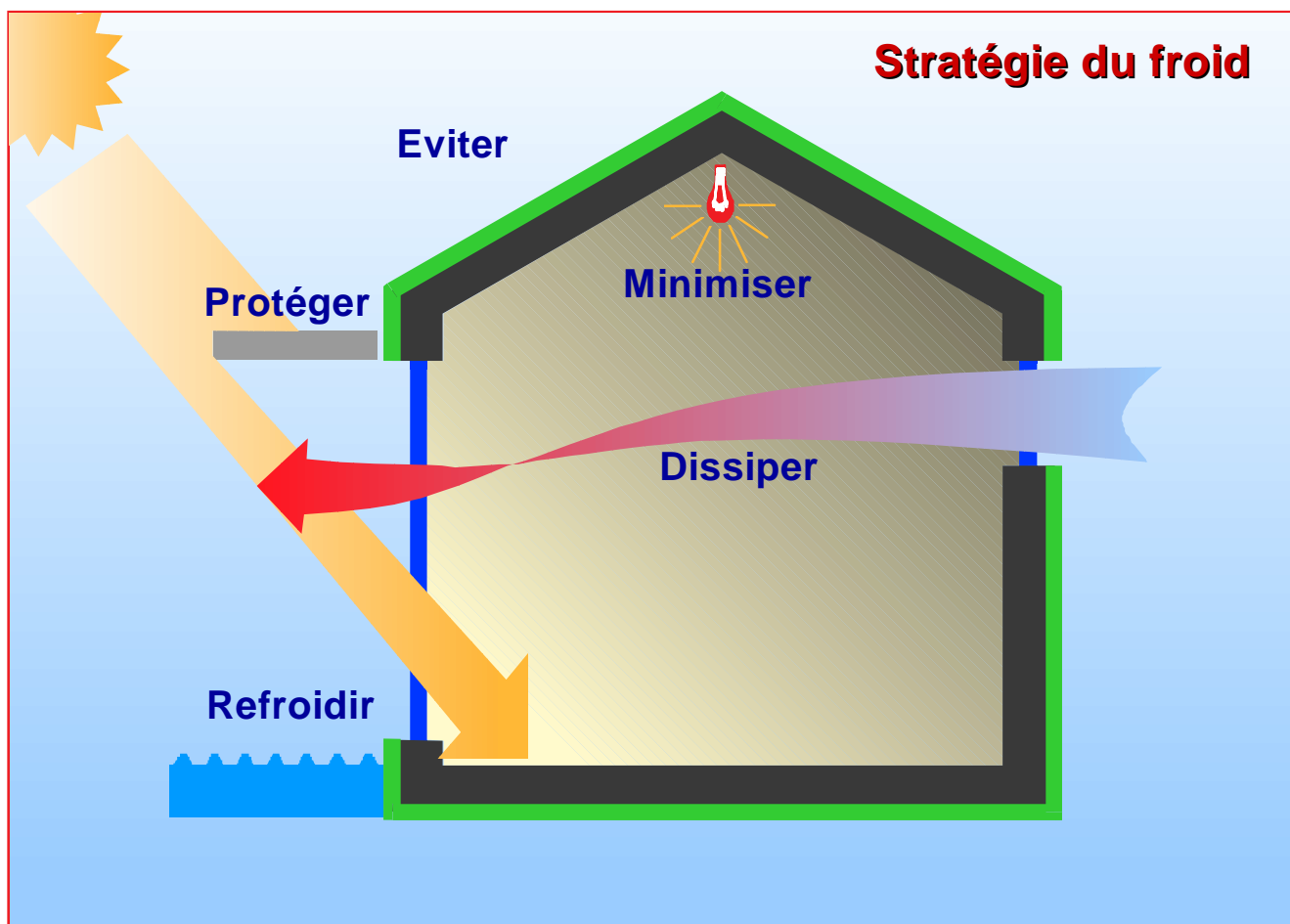
Le refroidissement des locaux peut facilement être assuré par des moyens naturels. Une première solution consiste à favoriser la ventilation (surtout nocturne, afin de déstocker la chaleur emmagasinée la journée) ou à augmenter la vitesse de l'air (effet Venturi, tour à vent, etc.). Un autre moyen consiste à refroidir l'air par des dispositifs naturels tels que des plans d'eau, des fontaines, de la végétation, des conduites enterrées, etc.

La figure 1 illustre la multiplicité des systèmes de refroidissement naturel développés par l'architecture mozarabe du XIII^e siècle : grands portiques ombragés, enfilades ouvertes, fontaines et jeux d'eau, végétation abondante, etc.

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement.



Patio de la Acequia, Generalife à Grenade, Espagne.



2 Les principes du confort d'été.

L'air que l'on respire en espace clos peut avoir des effets sur le confort et la santé, depuis la simple gêne – odeurs, somnolence, irritation des yeux et de la peau – jusqu'au développement de pathologies, comme l'allergie respiratoire. Négligée pendant de nombreuses années, la qualité de l'air intérieur est désormais un sujet de préoccupation des autorités sanitaires et un critère d'un habitat de qualité. De nombreux polluants sont en effet concentrés dans l'air intérieur, provenant à la fois de nos comportements, des produits utilisés et des matériaux de construction (fig. 1). La première source de pollution reste le monoxyde de carbone (CO), suivi du dioxyde de carbone (CO₂), d'allergènes d'animaux, d'acariens, de moisissures, de composés organiques volatils (COV) – dont toute la famille des aldéhydes – d'oxyde d'azote (NO_x) ou encore de fibres minérales artificielles.

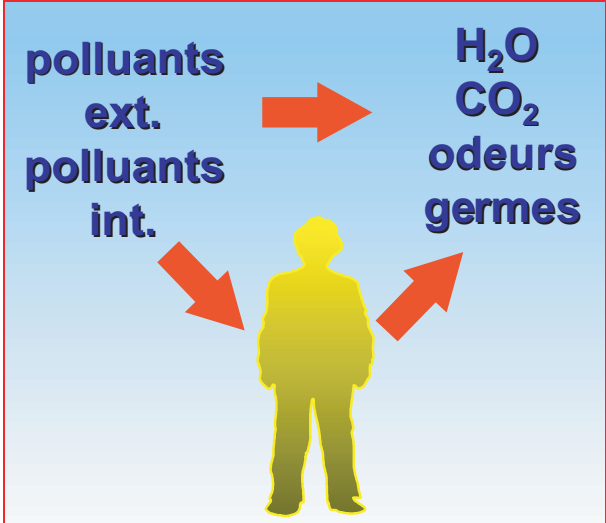
Selon la concentration, le monoxyde de carbone provoque nausées, vertiges et jusqu'à des intoxications. Il est produit par les appareils de combustion (gaz, fioul, bois, etc.) mal raccordés à un conduit d'évacuation ou mal utilisés, les gaz d'échappement des automobiles ou le tabagisme (chaque cigarette fumée émet 50 mg de CO). Les aldéhydes sont, pour leur part, des irritants des voies respiratoires. Ils sont présents dans de très nombreux produits: mousses isolantes, laques, colles, vernis, produits ménagers et pesticides. La plupart des bois agglomérés et contreplaqués en contiennent. Dernier exemple, un taux d'humidité excessif dans l'habitat entraîne à la fois un sentiment de mal-être et la prolifération de moisissures, à leur tour responsables de mauvaises odeurs, d'irritations, ou de réactions allergiques.

Les maisons bien isolées sont souvent étanches. L'air ne s'y renouvelle pas suffisamment et il est fréquent de constater que la pollution intérieure de l'air y est plus élevée qu'à l'extérieur. Le meilleur remède contre les désagréments évoqués est à la fois de ventiler et de contrôler les sources de pollution. Il est important de ventiler en permanence (ouverture des fenêtres, VMC), notamment lors d'activités comme la cuisine, le bricolage ou le ménage, pour extraire l'air vicié. En outre, le choix de matériaux de construction sains, l'utilisation limitée de produits ménagers et de désodorisants, et l'évacuation de la fumée de cigarette permettent de réduire les émissions de polluants. Avec un peu de volonté, il est désormais possible de trouver sur le marché des traitements du bois au sel de bore (fongicide et insecticide), des solvants à base d'agrumes, des peintures à l'eau ou à l'huile, aux résines naturelles, des laques ou colles sans solvant ou encore des produits d'entretien à base d'huiles essentielles de plantes.

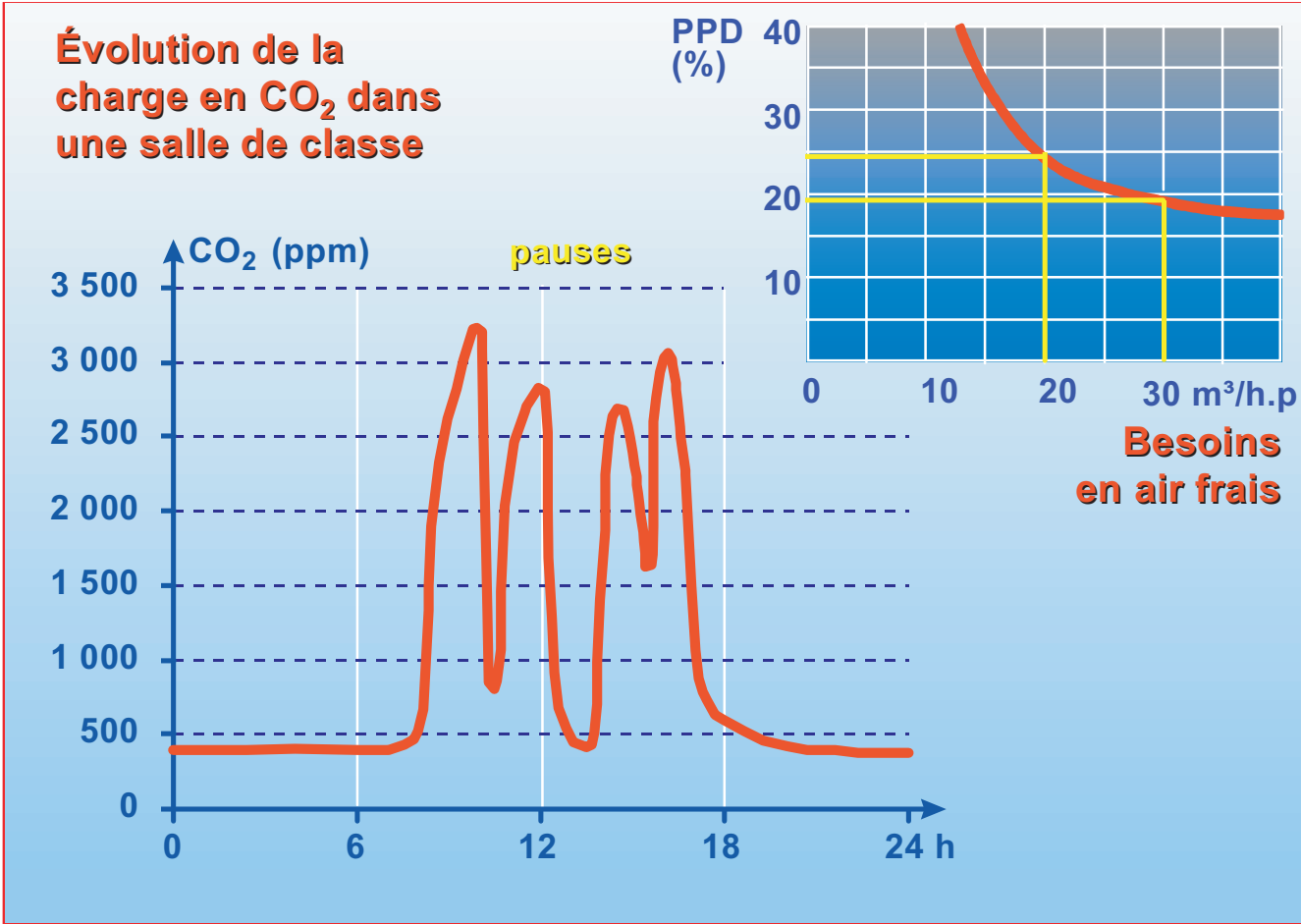
Au début des années 2000, les campagnes de mesures réalisées par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (www.air-interieur.org) montraient que les taux de renouvellement de l'air dans les logements et les écoles n'étaient pas satisfaisants. Variables dans les logements, les valeurs se situaient en majorité entre 11 et 31 m³/h/personne. Celles-ci étaient en outre très faibles dans les écoles avec des taux pouvant atteindre 7,7 m³/h/personne, bien en dessous du débit minimal de 15 m³/h/personne imposé par la réglementation (arrêté du 24 mars 1982).

Le confort respiratoire

La bonne qualité de l'air intérieur est importante pour les processus métaboliques et pour l'hygiène de chacun. La ventilation et la réduction des pollutions à la source sont les garantes d'un meilleur confort respiratoire et d'une meilleure santé.



Les divers paramètres intervenant dans la qualité de l'air. **1**



2 Évolution des taux de CO₂ dans une salle de classe. Débit d'air frais et pourcentage prévisible de personnes insatisfaites.

Depuis Lavoisier (1770), on sait que l'air est composé d'un mélange de gaz et de vapeur d'eau, comme indiqué à la figure 1. Les chiffres sont donnés en volume pour 1 000 parties d'air sec. Il est intéressant de noter que la répartition pour de l'air humide donne des chiffres légèrement différents. Plus des trois quarts du mélange d'air sont composés d'azote alors que l'oxygène n'en constitue qu'un cinquième. Le CO₂ occupe moins d'un demi pour cent du total mais toute modification subite, même légère, de ce pourcentage est immédiatement perçue par l'organisme.

La composition de l'air varie peu sur toute la surface de la terre. Par suite du brassage vertical de l'air, elle reste sensiblement la même jusqu'à environ 85 km d'altitude, sauf pour le CO₂, qui varie surtout dans les basses couches de l'atmosphère principalement à cause du cycle journalier chlorophyllien, de la vapeur d'eau (cycle journalier d'évaporation) et de l'ozone (O₃), dont la concentration varie dans certaines régions du monde.

L'oxygène est nécessaire aux échanges gazeux qui ont lieu dans les poumons. Ces échanges se font au travers de la paroi des alvéoles pulmonaires, qui agit comme une interface air-sang, essentiellement entre le gaz carbonique (CO₂) et l'oxygène (O₂). Cette opération est double : captation de l'oxygène alvéolaire par le globule rouge et évacuation du gaz carbonique sanguin vers l'alvéole. A la fin de l'expiration, il ne reste plus dans les poumons que l'air alvéolaire. L'oxygène et le gaz carbonique sont présents dans le sang à l'état dissous et en combinaisons chimiques.

Par définition, la composition de l'air inspiré diffère de celle de l'air expiré (Fig. 2). Si la proportion d'azote n'est pas modifiée (elle ne joue aucun rôle dans les processus physiologiques), la part de gaz carbonique passe de 0,03 % dans l'air inspiré à 5,4 % dans l'air expiré, puisqu'il se substitue à l'oxygène consommé pour entretenir le métabolisme.

Le volume courant normalement inspiré et expiré par un être humain âgé entre 25 et 40 ans, oscille entre 0,4 et 0,7 litres, pour 15 inspirations par minute. La capacité vitale constituée par le volume courant et la réserve tourne autour de 4 litres pour les hommes, de 3,1 litres pour les femmes et peut atteindre 7 litres pour les grands sportifs.

L'homme au repos ne consomme que 420 litres d'air par heure. S'il marche, sa consommation double et monte à 840 litres par heure. Un violent effort physique peut faire monter ses besoins en air à 4 à 6 m³ par heure. En considérant que 5 % de l'air expiré correspond à l'enrichissement en CO₂, la production de gaz carbonique, pour un homme au repos, correspond à 5 % de 420 litres, soit une vingtaine de litres par heure.

Le poumon est un organe vulnérable aux microbes et virus (infections), aux allergènes (asthme), aux particules minérales (asbestose due à l'amiante) ou organiques (moisissures), aux fumées occasionnées par le tabac et à certains gaz qui lui sont toxiques. Par contre, le poumon peut opérer comme un filtre à poussières lorsque celles-ci ne sont pas de taille trop petite.

La pureté de l'air à l'intérieur des habitations est un facteur primordial dans la sensation de confort ressentie par l'occupant.

L'air est principalement composé d'azote et d'oxygène.
L'homme au repos inspire 0,5 m³ d'air par heure et en expire 5 % sous forme de gaz carbonique.

Composition de l'air

(en volumes) :

Azote N₂	780,8
Oxygène O₂	209,4
Argon Ar	9,3
Gaz carbonique CO₂	0,3
Gaz rares et autres Ne, Kr, H₂, CH₄, etc.	0,02
Vapeur d'eau H₂O	variable

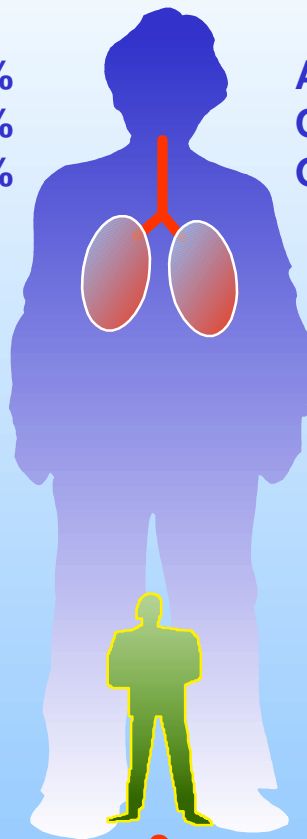
Composition d'un mélange d'air humide. **1**

Air inspiré :

Azote	: 79,2 %
Oxygène	: 20,7 %
Gaz carbonique	: 0,03 %

Air expiré :

Azote	: 79,2 %
Oxygène	: 15,4 %
Gaz carbonique	: 5,4 %



Besoins physiologiques en air

Air expiré par personne en une minute (en l) :



2 Modification de la composition de l'air après expiration.

Les sources extérieures de pollution de l'air sont principalement liées à l'activité économique, au logement et au transport. Les combustibles fossiles contribuent pour 87 % à la consommation énergétique mondiale (pétrole 37 %, charbon 27 %, gaz 23 %). La combustion de ces combustibles émet chaque année plus de 22 milliards de tonnes de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Le monoxyde de carbone (CO) résulte d'une combustion incomplète due au mauvais réglage d'appareils de chauffage et de moteurs (quel que soit le carburant). Incolore, inodore, il est très toxique, voire mortel. Les moteurs à essence mal réglés produisent 2 à 3 fois plus de CO que les moteurs Diesel ou GPL.

Le dioxyde de soufre (SO₂) est un produit de combustion du fioul, du charbon, du gasoil (véhicules Diesel) ou du raffinage du pétrole. Il intervient dans la formation des pluies acides. Ce phénomène, dont on parle depuis 1872 à propos des pluies tombant sur Manchester, n'a vraiment été reconnu qu'au cours des années 1980. Le dioxyde de soufre se combine aux oxydes d'azote dans l'atmosphère pour retomber sous forme d'acide sulfurique et nitrique. Une pluie est dite acide si son pH est inférieur à 5,6. Les pluies acides modifient le sol, altèrent les bâtiments à base de matériaux calcaires et favorisent les processus de corrosion.

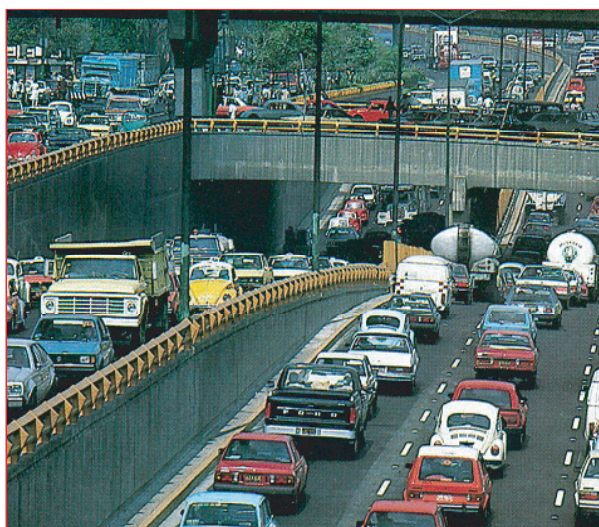
Le gaz carbonique (CO₂) est un constituant naturel de l'air. À ce titre, il n'est pas, à proprement parler, un polluant, mais il est le principal gaz responsable de l'effet de serre et provient à 75 % de la combustion des carburants fossiles. Le carbone rejeté dans l'atmosphère est passé de 0,09 milliard de tonnes en 1850 à 7 milliards en 2005.

Le dioxyde d'azote (NO₂) réagit aux ultraviolets pour produire le smog photochimique et contribue à la destruction de l'ozone de la basse stratosphère. Les combustions à haute température (véhicules à moteur, surtout Diesel) produisent du monoxyde d'azote (NO) qui se combine à l'oxygène de l'air pour former du protoxyde d'azote (N₂O) et avec de la vapeur d'eau, forme également de l'acide nitrique HNO₃.

La figure 2 indique la part de différents secteurs d'activité dans l'émission de quatre types de polluants atmosphériques, en France, en 2003.

Établi en 1997, le protocole de Kyoto est un calendrier international s'attaquant aux émissions de six gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), l'hydrofluorocarbure (HFC), l'hydrocarbure perfluoré (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆). En 2001, les États-Unis, qui émettent 30 à 35 % du total des gaz à effet de serre d'origine humaine, ont décidé de ne pas ratifier le protocole. L'Union européenne l'a ratifié le 31 mai 2002 et s'est engagée à réduire ses émissions de 8 %, entre 2008 et 2012, par rapport au niveau de 1990.

87 % de la consommation énergétique mondiale viennent des combustibles fossiles (pétrole 37 %, charbon 27 %, gaz 23 %). Leur combustion émet chaque année plus de 22 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère.



Les transports sont une des causes principales de la pollution de l'air. **1**

Sources extérieures de pollution de l'air

Rejets par secteur (en %)	SO ₂	CO ₂	CO	CH ₄
Transformation de l'énergie	52 %	14 %	-	5 %
Résidentiel/Tertiaire	12 %	24 %	30 %	6 %
Transport routier	5 %	25 %	35 %	-
Industrie manufacturière	26 %	20 %	25 %	18 %
Agriculture/Sylviculture	2 %	14 %	7 %	70 %
Autres transports	3 %	2 %	2 %	-
Autres	-	1 %	1 %	-
Total en 2003 (kt/an)	492 kt	346 000 kt	5 897 kt	2 775 kt

2 Contributions des différents secteurs d'activité à la pollution de l'air en France. (Source : CITEPA.)

La majorité des gens passe la plus grande partie de leur temps à l'intérieur de bâtiments. Or, il faut savoir que les bâtiments sont de plus en plus étanches et le renouvellement d'air par aération naturelle y devient donc insuffisant pour assurer la qualité de l'air. On enregistre aujourd'hui des niveaux de pollution parfois plus élevés à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments. Les impuretés de l'air ambiant proviennent aussi bien de l'air extérieur que de sources internes, qui découlent soit des activités de l'homme lui-même, soit des matériaux employés dans le bâtiment (Fig. 2). Les réglementations en vigueur imposent le respect d'une ventilation minimale des logements neufs. Dans les autres cas, il est primordial d'aérer régulièrement par les fenêtres.

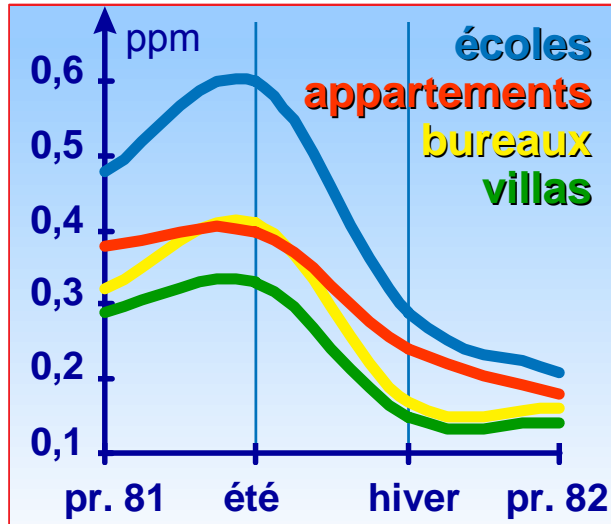
Les impuretés de l'air extérieur se retrouvent surtout en milieu pollué. Par exemple : les voies à grande circulation ou la proximité de zones industrielles ou agricoles, etc. Les polluants les plus toxiques sont les dioxydes d'azote (NO₂ : gaz d'échappement) et de soufre (SO₂ : combustion du fioul), le monoxyde de carbone (CO : produit de combustion), ainsi que le plomb et les poussières. On a pu mesurer à l'intérieur des bâtiments des concentrations d'impuretés comprises entre 50 et 80 % de la concentration dans l'air extérieur.

Les activités de l'homme constituent la deuxième source d'impuretés de l'air. Sa respiration charge l'air en gaz carbonique : un homme au repos produit 20 litres de CO₂ par heure, ce qui fait passer la proportion de gaz carbonique de 0,03 % dans l'air inspiré à 5,4 % dans l'air expiré. L'homme diffuse également de multiples odeurs et répand de nombreux micro-organismes. La cuisson des aliments, le chauffage domestique et les travaux de nettoyages (composés chlorés) dispensent également particules et gaz qui peuvent être sources d'irritation ou d'allergies. Les fumées de tabac sont une source importante d'impuretés (CO, NO_x, aldéhydes et particules très fines).

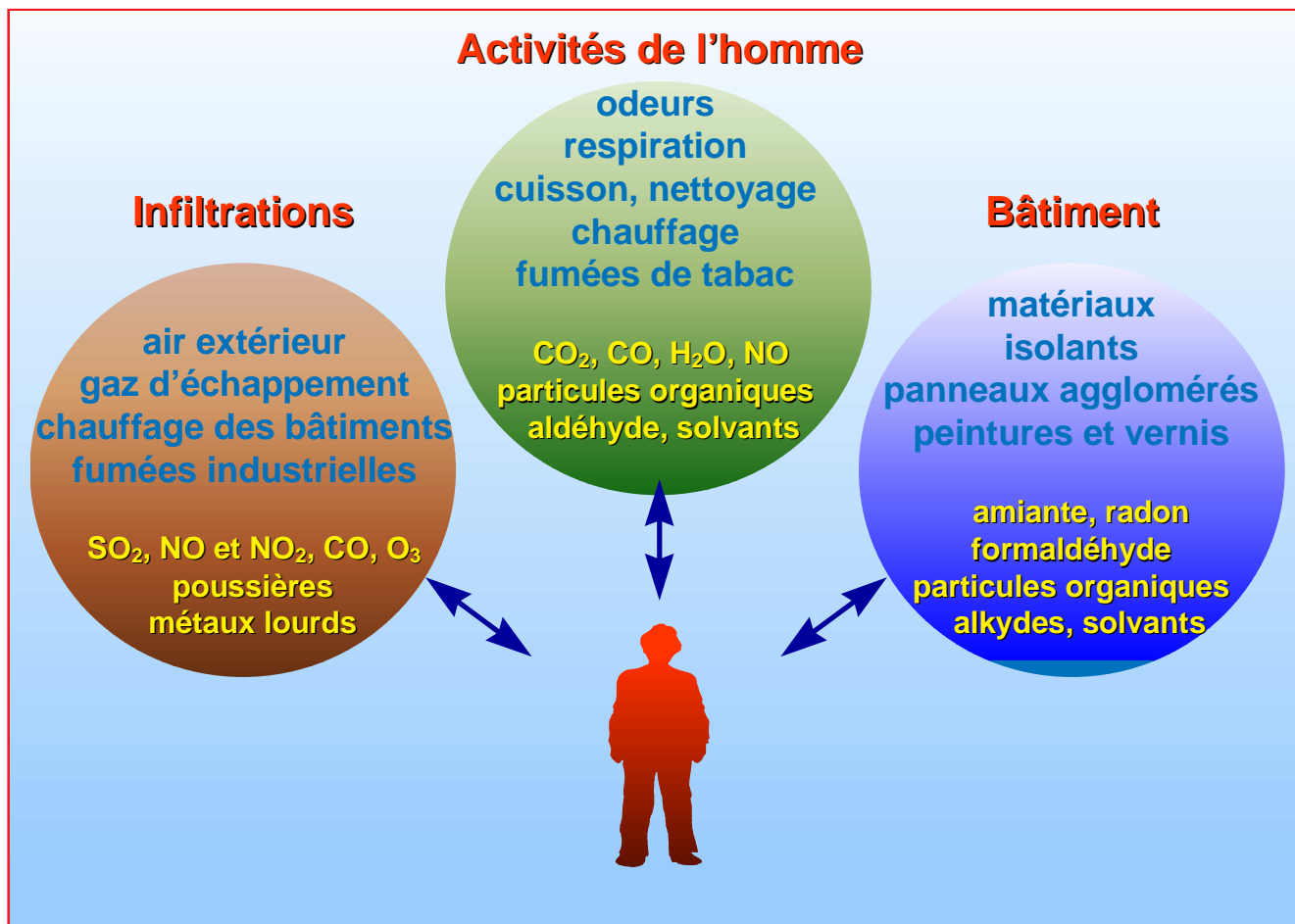
Les impuretés peuvent également provenir du bâtiment lui-même. Il s'agit le plus souvent de solvants contenus dans les matériaux. On trouve le formaldéhyde dans les panneaux de bois agglomérés ou dans les isolants à base d'urée-formaldéhyde. Ces composants se dégradent avec l'âge et sont libérés peu à peu, provoquant irritations, vertiges et difficultés respiratoires. La figure 1 illustre ce phénomène par des mesures faites sur une année dans quatre types de bâtiments neufs. Les valeurs ont été enregistrées à l'équilibre, après plusieurs heures, fenêtres fermées. Les phénomènes d'évaporation sont favorisés par la chaleur, ce qui explique le pic estival. Plus l'équipement est dense en panneaux de bois agglomérés, plus la teneur en formaldéhyde est élevée : après un an, elle se situe toujours au dessus de 0,1 ppm, limite acceptable pour la santé.

Du radon radioactif peut également être contenu dans certains plâtres industriels, mais à de très faibles concentrations. L'amiante, ou asbeste, est quant à lui très nocif et peut provoquer le cancer du poumon, à la suite d'une exposition longue et régulière. De nombreuses personnes sont atteintes de saturnisme (empoisonnement au plomb) le plus souvent à cause de vieilles peintures contenant du plomb (interdites depuis 1913). Cette maladie est très fréquente chez les enfants et les nourrissons, généralement plus sensibles que les adultes.

Les impuretés de l'air ambiant proviennent de l'air extérieur ou de sources internes, qui découlent soit des activités de l'homme, soit des matériaux employés dans le bâtiment.



Concentrations en formaldéhyde de bâtiments neufs. 1



2 Impuretés de l'air ambiant.

L'élévation de la température et la concentration des différentes impuretés dépendent de l'occupation du local et de l'activité de chaque personne qui s'y trouve. Une gestion de la ventilation par une sonde permettant d'évaluer le besoin de renouvellement de l'air est un gage d'économie et de confort.

La ventilation des locaux à pollution non spécifique, c'est-à-dire seulement provoquée par la présence humaine peut être pilotée par le contrôle des paramètres suivants :

- l'humidité ambiante (sonde d'humidité relative),
- la concentration en gaz carbonique,
- les odeurs, ou concentration en composés organiques volatils.

Il est également possible d'actionner la ventilation par une sonde de présence. Nous nous intéresserons ici à la concentration en gaz carbonique.

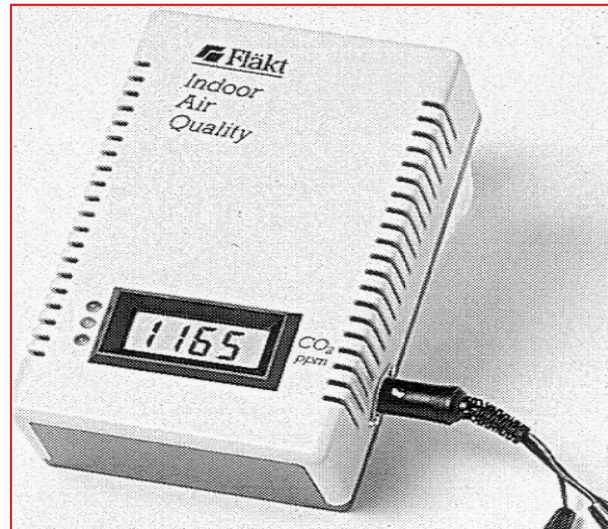
Le mécanisme de la respiration charge l'air en gaz carbonique et donne une image précise de la charge de l'air due à la présence humaine. On admet qu'une concentration de CO₂ de 0,15 % donne une qualité d'air encore acceptable, mais de fortes concentrations en CO₂ peuvent provoquer des maux de tête.

Certaines odeurs comme celle de l'oeuf pourri sont immédiatement ressenties comme gênantes. D'autres ne dérangent qu'à partir d'un certain niveau d'intensité : c'est le cas des odeurs corporelles. Ce domaine complexe où l'éducation et la position sociale jouent un rôle tout aussi important que la physiologie dans l'évaluation de l'inconfort a été étudié par O. Fanger. La complexité du problème est encore accentuée par la capacité d'adaptation de l'être humain, ce qui fait que des personnes entrant dans un local n'éprouveront pas la même sensation que celles qui s'y trouvent déjà depuis quelque temps.

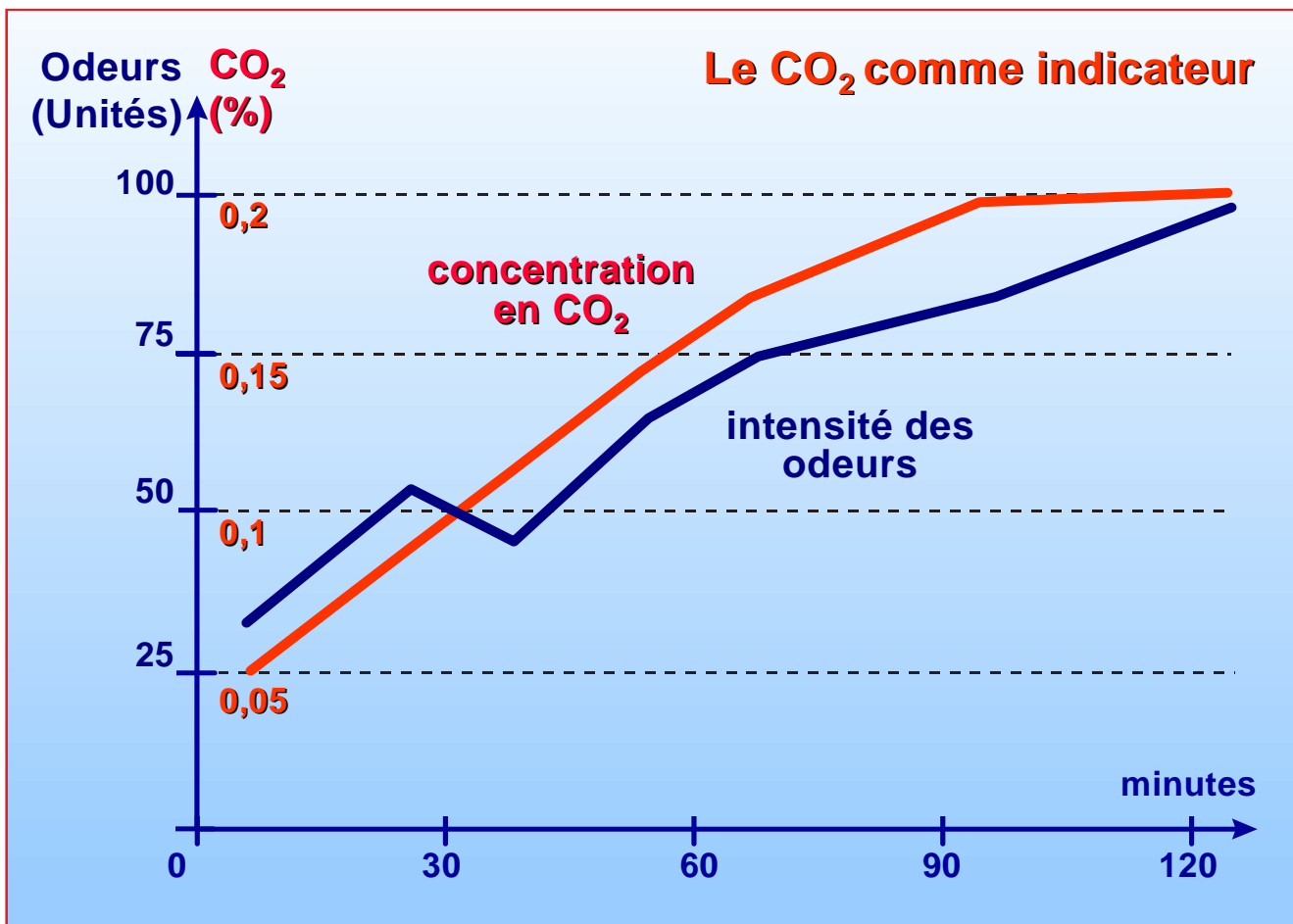
Fanger a d'abord mis en relation la mesure de l'intensité des odeurs et le pourcentage de mécontents. En recherchant un indicateur indirect facilement mesurable, il s'est avéré que le pourcentage de mécontents coïncidait bien avec la teneur en gaz carbonique.

La figure 2 représente l'élévation de la concentration en gaz carbonique (en ppm) et de l'intensité des odeurs durant un essai de 2 heures dans une pièce climatisée (30 m³, 4 personnes, apport d'air frais de 6 m³/h.pers). L'intensité des odeurs de 0 à 100 est jugée par des témoins extérieurs à la pièce et donne une première approche du niveau de qualité de l'air. En fait, on recourt souvent à la mesure de concentration en gaz carbonique pour donner une image plus précise : les courbes CO₂ / odeurs étant très proches l'une de l'autre.

La mesure du CO₂ est un bon indicateur de la charge de l'air ambiant due à la présence humaine. Elle permet de piloter un système de ventilation mécanique.



Sonde CO₂ reliée à un système de ventilation forcée (doc. CoSTIC).



2 Evolution parallèle entre la concentration en CO₂ et l'intensité des odeurs.

La qualité de l'air est déterminante, au même titre que la température ou l'humidité, pour un climat intérieur confortable. Alors que la plupart des individus passent la majeure partie de leur temps à l'intérieur de bâtiments, une pollution intérieure est plus facilement acceptée qu'une pollution à l'extérieur. A cet égard, l'aptitude physiologique du corps à s'accommoder jusqu'à un certain point aux substances polluantes présentes dans l'air ne doit pas faire illusion : certaines situations restent nocives, même si elles sont supportables. Le maintien de la qualité de l'air passe par le contrôle de son renouvellement.

La figure 1 illustre ce propos par une cheminée d'aération qui témoigne que les contraintes de ventilation peuvent inspirer une architecture qui répond aussi bien à des critères esthétiques qu'utilitaires.

Le problème du renouvellement d'air se pose aujourd'hui tant sur le plan de la quantité que sur celui de la qualité de l'air. Les tendances actuelles à économiser l'énergie par un calfeutrage généralisé conduisent à une aération réduite par manque de renouvellement. Il s'agit ici d'augmenter la quantité d'air renouvelé ce qui implique, dans une certaine mesure, de concéder quelques déperditions thermiques supplémentaires. Des réglementations ont été mises au point dans certains pays d'Europe (France, Belgique, Pays-Bas, etc.) qui déterminent soit des quantités minimales d'air frais à assurer dans le bâtiment, soit des sections minimales à respecter pour les bouches d'aération.

Le problème de la qualité de l'air se pose également pour les locaux climatisés, où on cherche à mieux recycler et épurer l'air tout en évitant les courants d'air. Un des grands écueils des systèmes de climatisation est qu'ils se mettent parfois, en l'absence d'un entretien adapté, à disséminer des microbes (nids microbiens), des poussières ou des fibres arrachées par le flux d'air lors de son passage sur des matériaux de construction mal protégés (fibres minérales, amiante, etc).

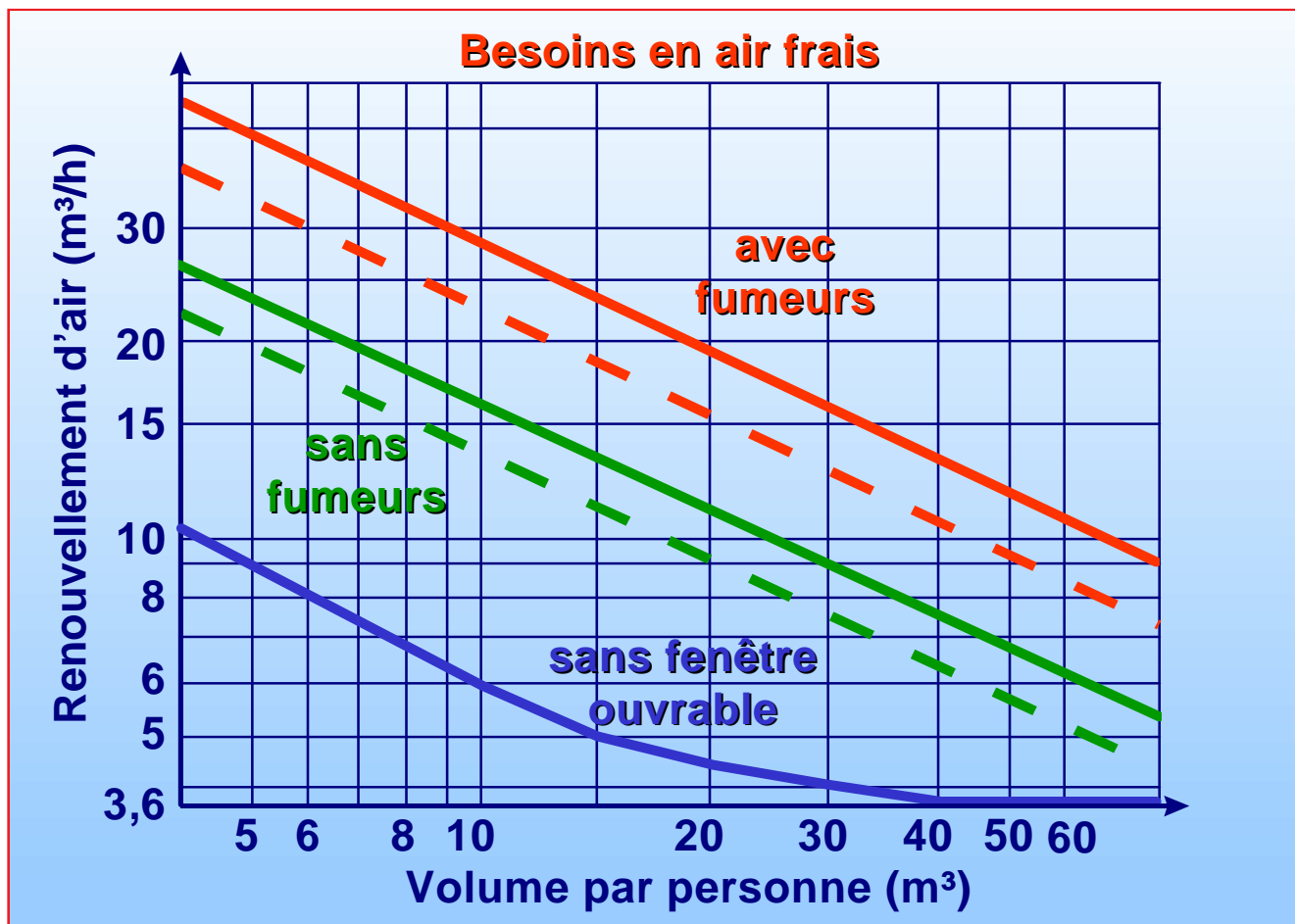
Lorsque toutes les mesures possibles ont été prises pour éliminer les sources d'impuretés, une ventilation reste nécessaire pour garantir un apport suffisant en oxygène, éliminer le gaz carbonique dégagé par l'homme (20 l/h en moyenne au repos), contrôler la teneur en humidité de l'air et évacuer les odeurs.

La figure 2 récapitule les besoins en air frais par personne, selon les directives de la norme suédoise. Sur l'axe vertical, on mesure le besoin en air frais, par personne, et sur l'axe horizontal, le volume de local attribué à chaque personne ($m^3/pers$). On remarque que le renouvellement d'air nécessaire diminue lorsque le volume occupé par l'individu augmente. Le renouvellement d'air doit être beaucoup plus important en présence de fumeurs (courbes rouges) qu'en leur absence (courbes vertes). Les courbes en pointillé représentent les débits relatifs à des locaux où séjournent plus de 20 personnes. La courbe bleue représente ce qu'il faut ajouter au débit nominal si l'occupant ne dispose pas d'une fenêtre ouvrable.

Un renouvellement de l'air minimal doit assurer le maintien de la qualité de l'air intérieur.



1 Cheminée d'aération, School of Engineering, Leicester (arch. Short Ford & Associates).



2 Renouvellement d'air selon la norme suédoise.

L'air extérieur s'introduit dans le bâtiment par ventilation (effet volontaire) ou par infiltration (effet involontaire). Il doit alors être chauffé ou refroidi pour être porté à la température intérieure de confort.

La ventilation assure le renouvellement sanitaire (apport d'air frais, évacuation des odeurs, etc.) nécessaire à la bonne santé de l'occupant. Il existe trois types de ventilation : naturelle, simple flux et double flux. Elle peut être assurée soit naturellement via des orifices d'amenée d'air frais et de rejet d'air vicié, soit mécaniquement, par des bouches de pulsion et d'extraction. Par contre, les infiltrations d'air dans un bâtiment sont dues à des différences de pression engendrées soit par le vent, soit par l'écart entre les températures intérieure et extérieure, et sont rendues possibles par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe.

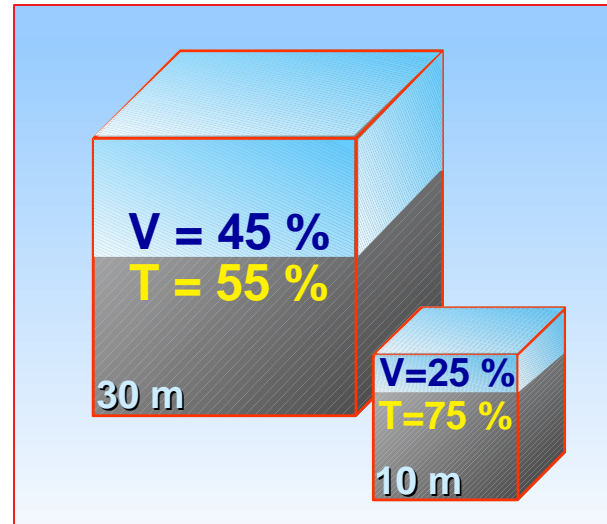
L'air extérieur introduit dans le bâtiment doit être porté à la température intérieure de confort, que ce soit par réchauffement (en saison de chauffe) ou par rafraîchissement (en été). Les déperditions thermiques dues à la mise en température de l'air extérieur sont donc proportionnelles :

- au volume d'air réchauffé ou rafraîchi (soit le volume net intérieur, ou forfaitairement, $0,8 \times$ le volume bâti),
- au taux de renouvellement d'air n (nombre de fois que le volume d'air est renouvelé par de l'air frais par heure, mesuré en h^{-1}), et
- à la chaleur volumique de l'air (chaleur nécessaire pour réchauffer 1 m^3 d'air de 1 Kelvin, soit $0,34 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{K}$).

La figure 1 rappelle que, dans le bilan global, la proportion des déperditions dues au renouvellement d'air (V) et des déperditions par transmission (T) au droit de l'enveloppe varie suivant le rapport de compacité S/V . Pour un volume cubique défini par un côté de 30 mètres, le renouvellement d'air est responsable de 45 % des déperditions totales, alors que ce chiffre passe à 25 % pour un même volume de 10 mètres de côté. Ces calculs ont été effectués sur la base d'un taux de renouvellement d'air $n = 0,5$ volume par heure et pour un niveau d'isolation thermique moyen de $K = 0,65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Par ailleurs, plus l'enveloppe est isolée, plus la part relative aux déperditions par renouvellement d'air augmente dans le bilan global.

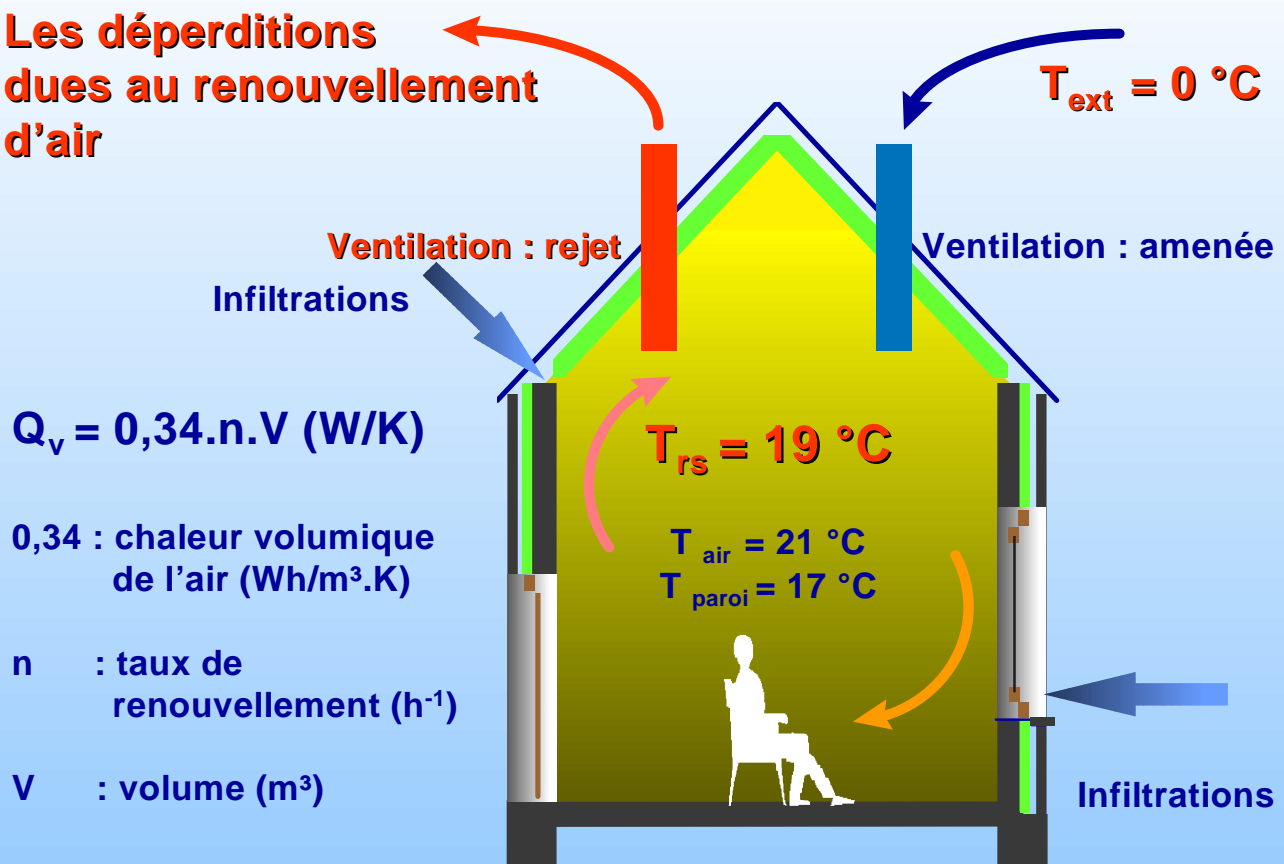
La figure 2 synthétise la contribution des infiltrations et de la ventilation dans le réchauffement de l'air en saison froide. L'air est introduit par le système de ventilation et les défauts de l'enveloppe. Il est progressivement réchauffé en soutirant de la chaleur à l'ambiance intérieure. Le chauffage doit donc fournir un apport de chaleur supplémentaire pour maintenir les conditions de confort. L'air peut ensuite être extrait naturellement par thermocirculation et effet de cheminée (ascendance de l'air chaud), ou mécaniquement par un ventilateur. Il quitte l'ambiance intérieure avec les calories qu'il y a gagnées, occasionnant une perte de chaleur sensible. Pour réduire cette déperdition, il existe des systèmes de ventilation avec récupération de la chaleur qui parviennent à conserver entre 50 et 60 % de cette chaleur à l'intérieur.

L'air extérieur introduit dans le bâtiment par la ventilation ou par infiltration doit être chauffé ou refroidi pour être porté à la température de confort intérieur.



La part des déperditions dans le bilan énergétique dépend de la compacité. **1**

Les déperditions dues au renouvellement d'air



2 Le renouvellement d'air comprend le renouvellement sanitaire et les infiltrations.

La ventilation et le renouvellement d'air contribuent au maintien de la qualité de l'air pour autant que la propreté de la source d'air soit vérifiée (ce qui n'est pas toujours le cas en ville), et au rafraîchissement des édifices en été.

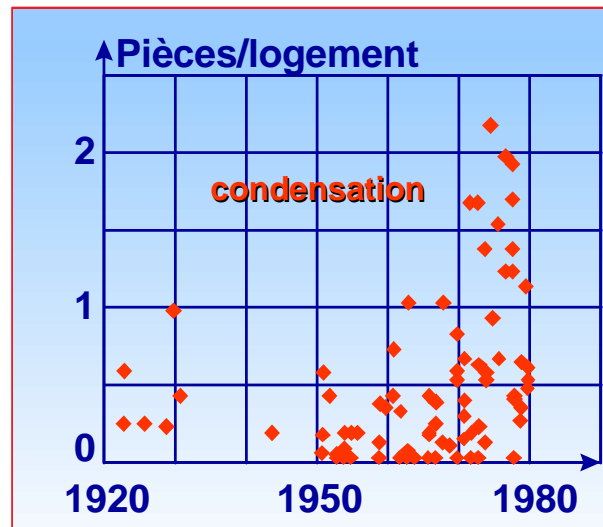
La qualité de l'air est communément obtenue dans les bâtiments par renouvellement d'air. Celui-ci peut être admis dans l'édifice par des bouches équipant les fenêtres ou par infiltration au droit des défauts d'étanchéité. Cet air peut être extrait naturellement par différences de pression entre l'air intérieur et l'air extérieur via des gaines de ventilation, ou par des ventilateurs, généralement placés dans les pièces humides (cuisine, salle de bain, WC). L'air frais permet de combattre la pollution intérieure et d'évacuer la vapeur d'eau (environ 50 g/h et par personne).

La figure 1 présente les résultats d'une enquête portant sur des logements construits entre 1920 et 1980 en Belgique. Sur l'axe vertical, on a reporté le nombre de pièces qui présentaient un problème de condensation dans le logement. Les constructions actuelles étant beaucoup plus étanches que par le passé, de nombreux problèmes de condensation surgissent alors en l'absence de ventilation. La zone jaune permet de constater que plus d'une pièce par logement présente un problème de condensation pour des bâtiments construits entre 1970 et 1980. Les problèmes de condensation peuvent être par ailleurs les signes d'une médiocre qualité de l'air.

La surchauffe d'un local, généralement due à une température de l'air trop élevée, engendre chez l'occupant une sensation d'inconfort thermique. La température de l'air dépend de la température de surface des parois, des apports externes dus au soleil, du système de chauffage du local et des apports internes dus à l'occupation du local. La ventilation représente un des moyens de réduire cette température en évacuant l'air chaud vers un puits de chaleur ou vers un système de récupérateur. La figure 2 illustre l'évolution des températures dans une maison solaire passive (Maison Pléiade à Louvain-la-Neuve) au cours des premiers jours de juillet 1995. Très ouverte au soleil, la maison risque de souffrir de surchauffes importantes. Deux stratégies de protection peuvent être mises en place : protections solaires et ventilation nocturne, réalisée en laissant les fenêtres entrouvertes. Seule la ventilation permet d'évacuer la chaleur accumulée durant la journée : on remarque que la courbe bleue (températures à l'intérieur) augmente mais plus faiblement que la courbe rouge (températures extérieures).

Qu'elle soit assurée par des moyens naturels (différences de pression) ou par des moyens mécaniques (ventilateurs de pulsion ou extraction), l'air frais doit efficacement balayer l'espace tout en étant limité à des vitesses inférieures à 0,2 m/s pour le confort de l'occupant. A cette fin, les ouvertures de sortie d'air chaud seront plus grandes que les ouvertures d'entrée d'air frais et leur position déterminera le trajet de l'air et donc l'existence éventuelle de zones non balayées. Il ne faut pas oublier que des petits dispositifs constructifs (auvent, avancée de toiture, etc.) peuvent avoir une influence importante sur les mouvements de l'air et sur l'efficacité de la ventilation.

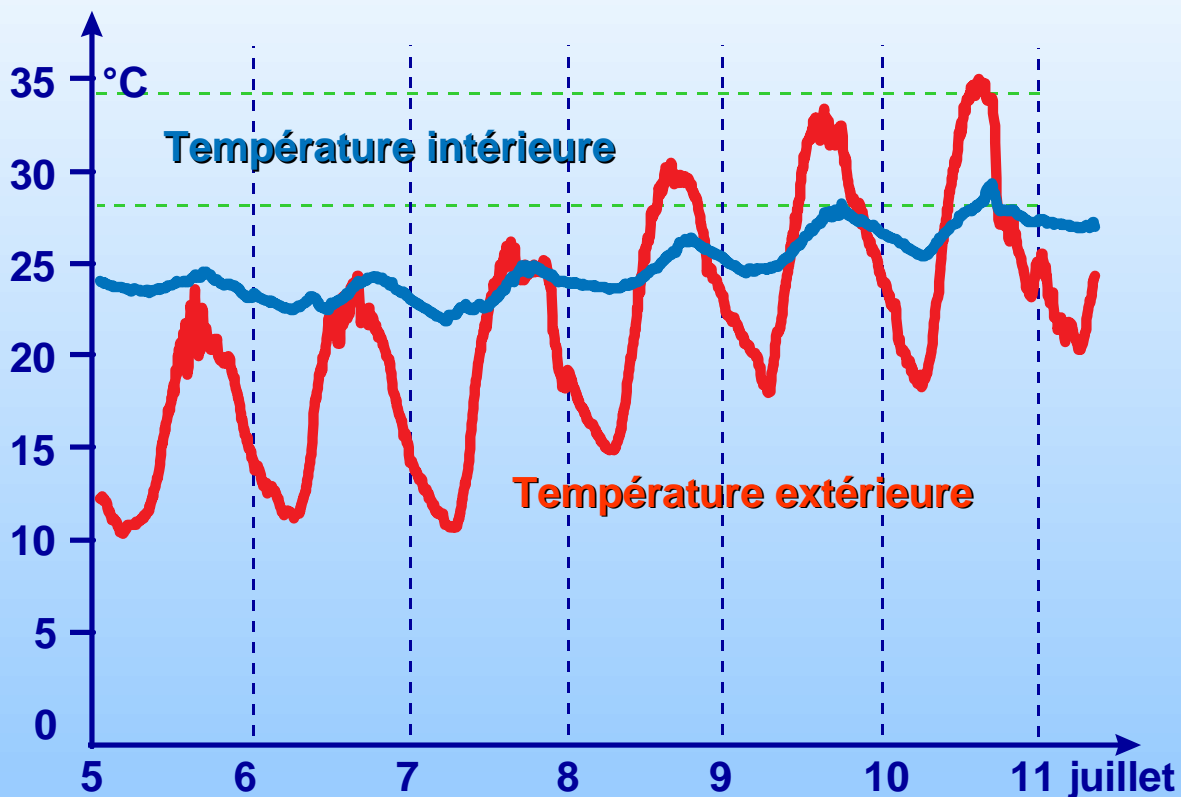
La ventilation contribue à la qualité de l'air (par évacuation des polluants et de la vapeur d'eau), et au rafraîchissement des édifices en été (déstockage de la chaleur).



Seule la ventilation peut résoudre les problèmes de qualité d'air et de condensation.

1

Ventilation et rafraîchissement



2 Effet de la ventilation nocturne sur la température d'une maison hyper-isolée en période estivale.

Le renouvellement d'air et la ventilation visent à maintenir la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments. La ventilation, dans un sens plus strict, est également un outil de lutte contre la surchauffe.

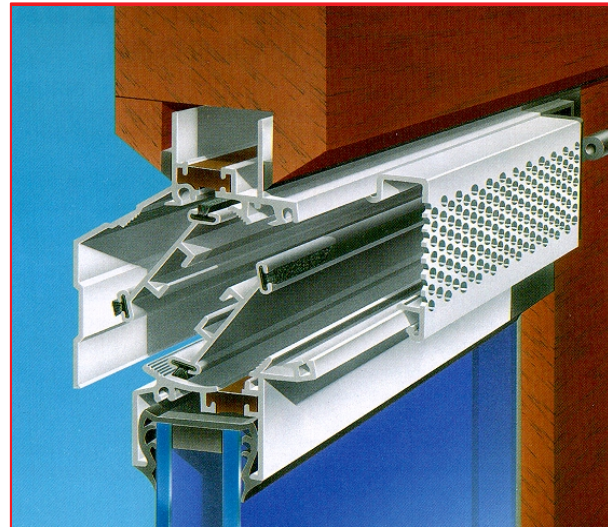
La qualité de l'air est assurée par le contrôle des débits d'air à l'entrée et à la sortie des bâtiments. Il faut donc considérer un schéma de circulation de l'air comprenant des accès pour l'air frais et des exutoires pour l'air vicié. Si le renouvellement est naturel, il doit répondre à des conditions de pression différentielle. Généralement, un tirage naturel de l'air est assuré par une cheminée haute pour l'exutoire : l'air chaud s'élève naturellement et s'échappe par la cheminée alors que de l'air extérieur entre dans le bâtiment par les ouvertures. Cette différence de pression peut être assurée par une différence de température entre l'air à proximité d'une façade exposée au soleil et l'air en contact avec la façade à l'ombre. Il faut cependant que l'organisation interne du bâtiment permette la libre circulation de l'air. Un renouvellement d'air minimum peut être assuré par des entrées d'air non obturables intégrées aux fenêtres (Fig. 1).

Même lorsqu'un bâtiment est protégé du soleil, les températures intérieures en été peuvent sortir de la zone de confort. Dans les climats chauds et humides, la question de la ventilation est une question fondamentale car seul le brassage de l'air permet de retrouver une sensation de fraîcheur et de déstocker la chaleur emmagasinée dans les matériaux. La figure 2 illustre ce point par une photographie de l'Indian Institute of Management, en Inde, où l'architecte L. Kahn a orienté ses bâtiments au nord-est (vent dominant), a créé une façade épaisse pour réduire l'insolation sur les vitrages et a également prévu la ventilation naturelle du toit-terrasse pour déstocker la chaleur accumulée la journée et permettre aux occupants d'y dormir la nuit à l'air libre.

Pour favoriser la ventilation naturelle, l'architecte doit aussi étudier le régime local des vents. Les vents sont par nature variables mais il existe toujours, pour un site donné, un vent dominant. Lorsqu'il souffle sur un bâtiment, le vent crée des surpressions et des dépressions sur les façades et à l'intérieur. Si le bâtiment se présente avec un angle de 45° par rapport au vent, les surpressions et les dépressions sont maximales et favorisent la ventilation. Des dispositifs tels que des déflecteurs peuvent être incorporés au bâtiment pour modifier localement l'effet des vents et créer des dépressions facilitant l'évacuation de l'air vicié. Par effet Venturi, on peut également créer une augmentation de vitesse qui encourage l'évacuation de l'air.

En climat chaud et sec, il est intéressant de chercher à rafraîchir les habitations en augmentant le taux d'humidité dans l'air. De nombreux systèmes sont utilisés autour de la Méditerranée, comme les tours à vent (Fig. 2), qui forcent les vents secs à s'humidifier au contact de masses d'eau contenues dans des jarres avant de ventiler et de rafraîchir l'habitation. En effet, le vent sec perd une partie de sa chaleur pour se charger d'eau en la faisant passer de l'état liquide à l'état de vapeur.

Le contrôle du renouvellement d'air et de la ventilation permet de maintenir la qualité de l'air et de rafraîchir le bâtiment.



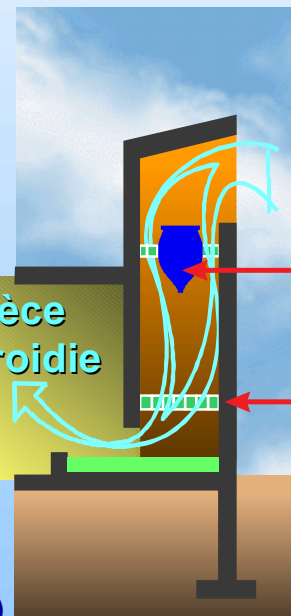
Dispositif d'aération intégré aux menuiseries (doc. Aralco). **1**

Institut indien de gestion
Ahmedabad (arch. Kahn)

Ventilation des terrasses
(déstockage nocturne)



**Renouvellement d'air
et ventilation naturelle**



entrée d'air

jarre à eau

pièce
refroidie

plâtre en
caillasse

Schéma d'une tour à vent
(Iran)

2 Logements de l'Indian Institute of Management (Inde) et schéma d'une tour à vent (Iran).

Dans les bâtiments hautement isolés, la part de l'énergie consacrée à chauffer ou à refroidir l'air de ventilation occupe une place très importante dans le bilan énergétique. Quand, en raison de l'étanchéité du bâtiment et en l'absence de ventilation spécifique, le taux de renouvellement d'air est inférieur à un certain volume par heure (en fonction du volume vide du bâtiment), la charge polluante de l'air à l'intérieur du bâtiment risque de devenir excessive (émanations chimiques, radiations de certains matériaux de construction, odeurs corporelles, CO₂, etc.). Il faut donc parvenir à ventiler les bâtiments sans y consacrer trop d'énergie.

Une manière de réduire la quantité d'énergie utilisée à chauffer ou rafraîchir l'air frais, sans abaisser le taux de renouvellement de l'air en deçà des recommandations sanitaires, consiste à réchauffer l'air entrant par la chaleur de l'air sortant, par le biais d'échangeurs statiques air-air. La ventilation mécanique contrôlée (VMC) est alors dite à double flux.

Une autre manière consiste à utiliser la chaleur de l'air vicié extrait pour préchauffer l'eau chaude sanitaire ou le système de chauffage. Moins courantes, des solutions passives existent également : des conduites d'arrivée d'air enfouies dans le sol (puits canadien) permettent à l'air chaud de se rafraîchir en été, alors qu'il se réchauffe en hiver (la température sous terre étant supérieure à la température de l'air).

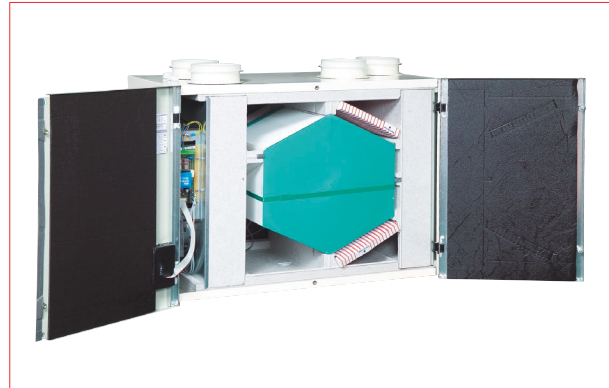
Actuellement, les échangeurs statiques à plaques (fig. 1 et 2) sont les systèmes les plus usités dans le secteur résidentiel. Ils sont composés de plaques de tubes entrelacés où circulent l'air frais et l'air vicié. Le matériau utilisé, très bon conducteur de chaleur, permet un transfert de chaleur rapide. Ces systèmes sont simples et requièrent peu d'entretien, à l'exception des filtres qu'il faut régulièrement remplacer. Pour éviter les surchauffes en été, il est nécessaire de prévoir un système de by-pass.

Les échangeurs air-air affichent des rendements de 60 à 70 %, voire 90 % pour des modèles à hauts rendements. Il ne faut cependant pas oublier que ces systèmes sont aussi consommateurs d'énergie primaire pour actionner leurs ventilateurs. Les échangeurs de chaleur sont intéressants à mettre en œuvre quand les déperditions sont déjà minimales par ailleurs, c'est-à-dire si l'étanchéité du bâtiment est correctement exécutée. Enfin, les rendements de ces systèmes dépendent aussi du climat local ; les échangeurs de chaleur fonctionnent mieux dans les climats rigoureux où existent de fortes différences de température entre l'extérieur et l'ambiance intérieure.

En moyenne, la ventilation double flux permet une économie de chauffage d'environ 15 %, par rapport à une ventilation simple flux classique, et environ 8 %, par rapport à une simple flux hygro-régulée. Les longueurs de gaines supplémentaires pour distribuer l'air neuf et le prix de l'échangeur entraînent toutefois un surcoût. Le temps de retour est en général de 3 à 5 ans.

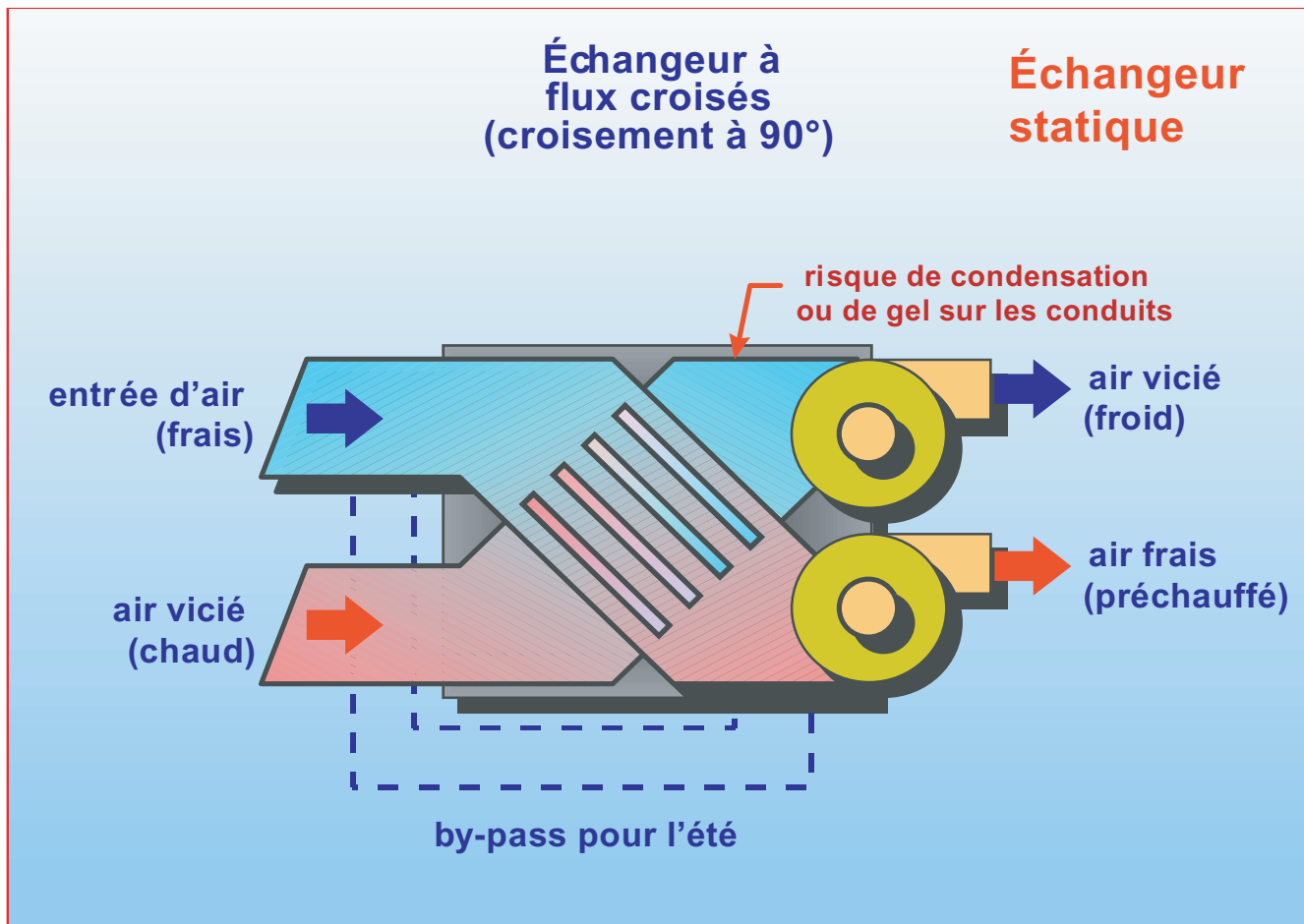
Dans la gamme supérieure et pour une efficacité maximale, le système de ventilation peut, en outre, associer une minipompe à chaleur avec l'échangeur de chaleur. C'est la VMC double flux thermodynamique. L'air entrant est rafraîchi l'été et préchauffé l'hiver.

Des échangeurs de chaleur branchés sur les extractions d'air vicié permettent de récupérer 60 à 90 % de la chaleur pour réchauffer l'air de ventilation.



Échangeur de chaleur à plaques (doc. Atlantic Climatisation).

1



2 Schéma de fonctionnement d'un échangeur à plaques.

Un bon éclairage doit garantir à l'habitant qu'il puisse exercer ses activités le plus efficacement possible (performance visuelle), en assurant son bien-être (confort visuel) et en lui apportant un certain agrément visuel (lumière naturelle).

La performance visuelle souhaitable est déterminée par le travail à accomplir et dépend des paramètres suivants :

- le niveau d'éclairement de la surface de travail (Fig.2) ;
- le contraste de luminance entre l'objet observé et son support.

L'éclairement est l'effet produit par le flux lumineux tombant d'une source lumineuse naturelle ou artificielle sur une surface donnée. Il s'exprime en Lux.

La luminance caractérise le flux lumineux quittant une surface vers l'œil de l'observateur. Elle s'exprime en candelas par m² (Fig. 1).

L'inconfort visuel est lié à l'éblouissement, c'est-à-dire à la présence d'un fort contraste de luminances dans le champ visuel. On distingue deux types d'éblouissement :

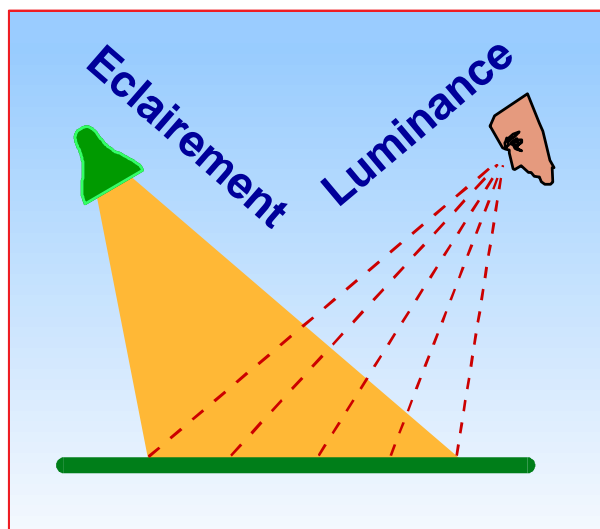
- physiologique : apparition d'un voile dans le champ de vision empêchant de distinguer tout objet.
- psychologique : la gêne n'altérant pas totalement la vision.

Pratiquement, ce sont le plus souvent les fenêtres et les installations d'éclairage inappropriées qui sont la cause des situations d'inconfort visuel. Un éclairage insuffisant dû à un éclairage déficient est source de fatigue. La variation rapide de l'intensité de l'éclairage naturel (de 5 000 lux pour un ciel couvert à 100 000 lux en plein soleil) peut provoquer l'éblouissement.

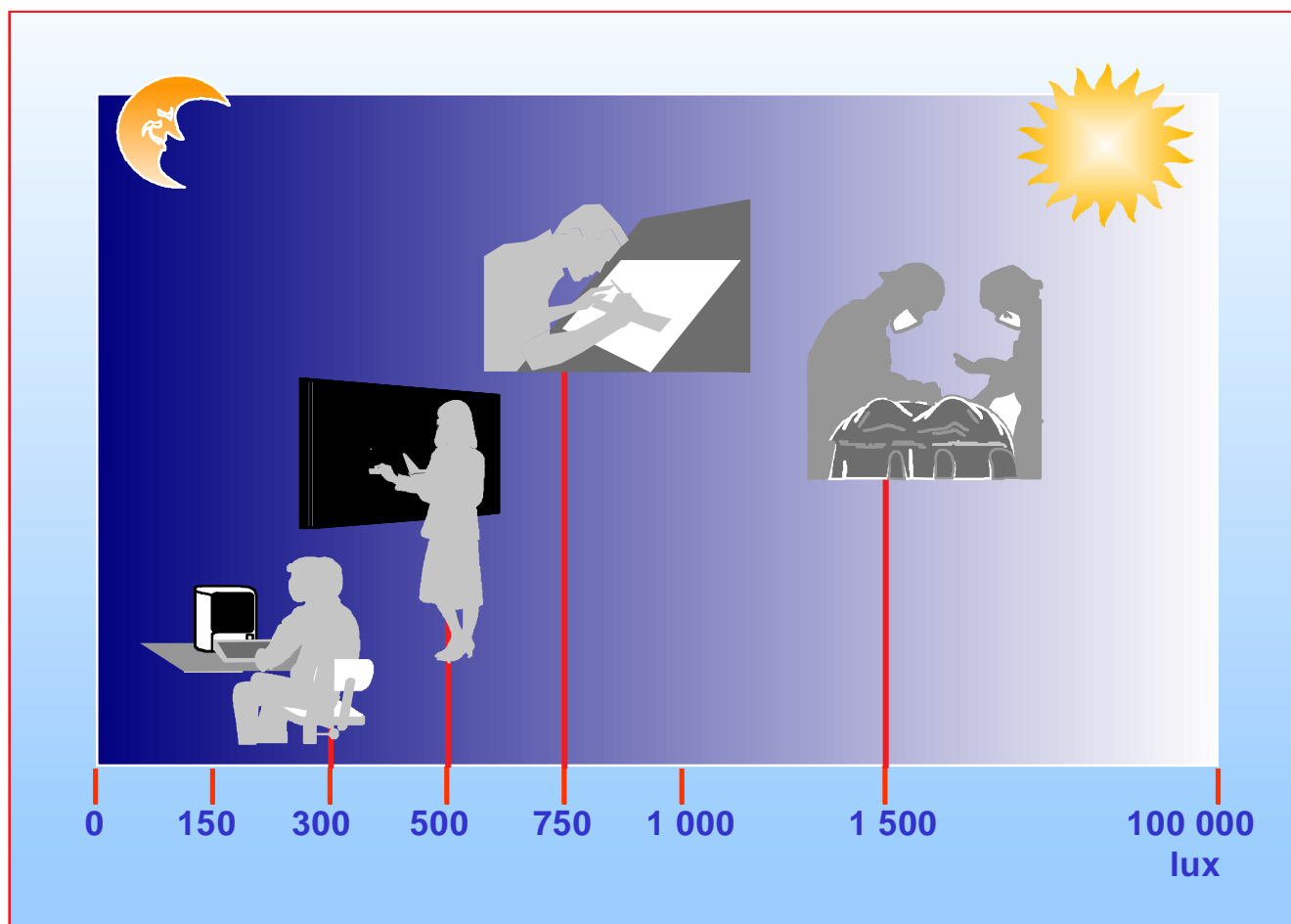
L'agrément visuel, quant à lui, est une notion subjective qu'on associe généralement :

- à la présence de lumière naturelle (rendu des couleurs),
- à la variation dans le temps de cette lumière,
- à certains effets d'éclairage artificiel et à l'harmonie des couleurs.

L'environnement visuel doit permettre de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable.



Eclairement et luminance. 1



2 Le niveau d'éclairement de référence est adapté à l'activité prévue.

Les caractéristiques physiques d'une source lumineuse

La physique moderne reconnaît au rayonnement électromagnétique deux caractères : ondulatoire et corpusculaire.

Le caractère ondulatoire repose sur la notion de radiation monochromatique, c'est-à-dire une oscillation sinusoïdale caractérisée par sa période T (en seconde) ou son inverse, la fréquence $\nu = 1/T$ (en hertz).

On préférera, en pratique, parler de longueur d'onde λ représentant la distance parcourue par l'onde pendant la durée d'une période et mesurée en nanomètre (Fig. 1). La longueur d'onde est reliée à la fréquence par la vitesse c de propagation de l'onde : $c = \lambda \cdot \nu$ où c ne dépend que du milieu de propagation (environ 300 000 km/s pour l'air).

Le caractère corpusculaire de la lumière a été mis en évidence par l'observation du fait que l'émission et l'absorption de lumière par la matière se font de manière discontinue, comme si le rayonnement était composé de corpuscules (photons), dont l'énergie $\Delta E = h \cdot \nu$ où h est la constante de Planck et s'exprime en électron-volt (c'est la théorie des quanta).

Le mélange des diverses radiations du domaine visible forme la lumière naturelle, ou lumière blanche, la seule qui permette à l'œil d'apprécier finement les couleurs. Les différentes radiations colorées composant la lumière naturelle apparaissent aisément lors de leur réfraction dans un prisme ou dans des gouttes d'eau (phénomène de l'arc-en-ciel). Elles permettent de définir un spectre continu de rayonnement de la lumière naturelle (Fig. 2, courbe blanche).

L'œil est naturellement adapté à la lumière du jour. Par conséquent, la lumière émise par les sources artificielles doit avoir la même composition spectrale que la lumière naturelle pour que ne soit pas altérée la vision des couleurs. En effet, tout objet réfléchit sélectivement les radiations colorées qu'il reçoit. Par exemple, s'il ne réfléchit que le rouge, il apparaît rouge. Si, par contre, la lumière artificielle incidente ne contient pas de rayonnement dans le domaine du rouge, la couleur apparente de l'objet est différente. Ce phénomène est courant avec l'éclairage fluorescent, spécialement dans les tons qui apparaissent orange-rouge en lumière naturelle.

Si l'on étudie une source lumineuse artificielle et qu'on établit son spectre de rayonnement, on constate qu'il peut être continu (Fig. 2, lampe fluorescente ou lampe au tungstène) ou discontinu (Fig. 2, lampe à vapeur de sodium), c'est-à-dire que la lumière émise n'est pas une lumière blanche (naturelle). Tout spectre lumineux, différant de celui de la lumière du jour, modifie la couleur apparente d'un objet.

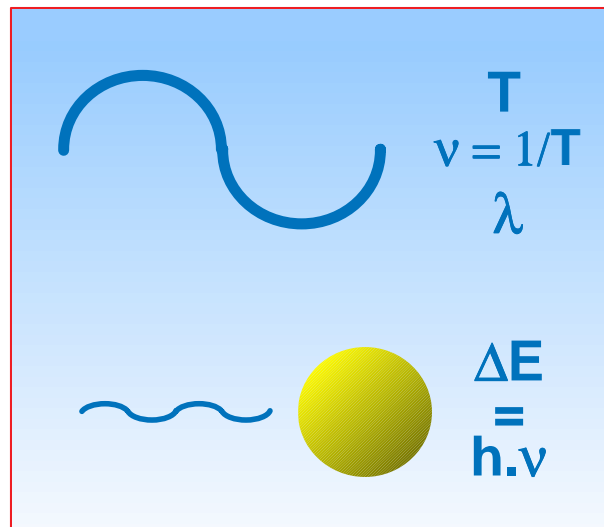
La figure 2 permet de comparer le spectre de la lumière naturelle (courbe blanche) à ceux de diverses lumières artificielles. En abscisse, on trouve les fréquences en nanomètre et en ordonnée, l'énergie relative du flux lumineux des lampes étudiées (en %). En jaune, on rappelle la courbe de sensibilité de l'œil, dont le maximum correspond à la longueur d'onde du vert-jaune (555 nm). Les longueurs d'onde correspondant à la sensibilité maximale de l'œil sont :

- pour le bleu : 450 nm,
- pour le vert : 540 nm,
- pour le rouge : 610 nm.

Les caractéristiques physiques d'une source lumineuse

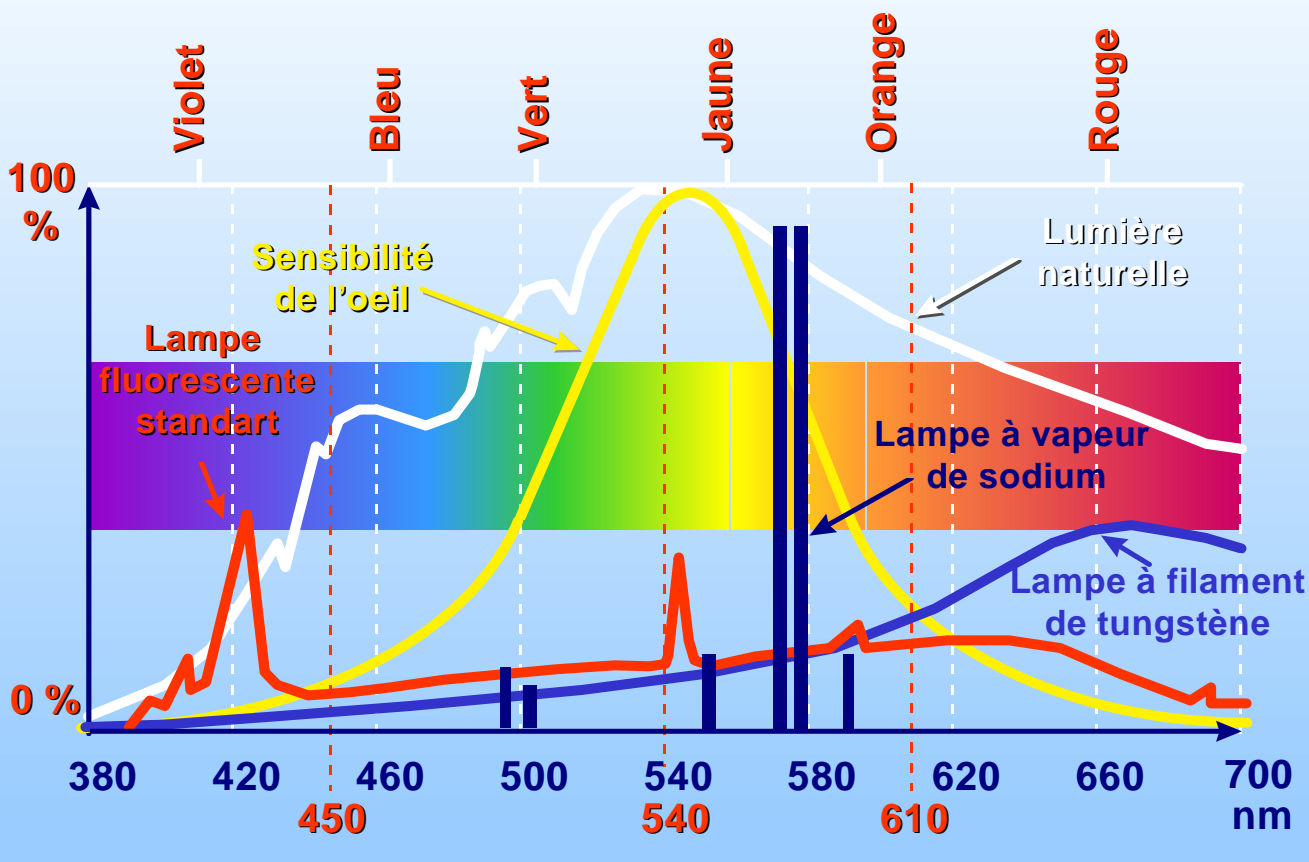
Le caractère ondulatoire de la lumière est caractérisé par sa période T , sa fréquence ν et sa longueur d'onde λ .

La lumière naturelle est appelée lumière blanche.



Caractères ondulatoire et corpusculaire de la lumière. 1

Lumière naturelle et lumières artificielles



2 Comparaison entre la répartition spectrale de la lumière naturelle et de lumières artificielles.

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules mais ils se déplacent en ligne droite.

Tous les rayonnements électromagnétiques ne sont pas perceptibles par l'œil humain : rayons X, ultraviolets, infrarouge, ondes radio, etc. se situent en dehors du domaine visible. Seuls ceux dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 700 nanomètres provoquent une excitation lumineuse et forment le spectre visible. D'autres auteurs situent cette limite à 770 nm : une limite précise ne peut être définie car elle dépend de l'intensité lumineuse frappant la rétine et de l'acuité visuelle de l'observateur. Cette particularité dérive de la constitution de l'œil et particulièrement de la sensibilité des photorécepteurs de la rétine, qui diffère pour chaque longueur d'onde λ .

La figure 1 reprend la gamme des couleurs qui constituent, par définition, la lumière dite blanche, en référence à leur longueur d'onde respective. La lumière naturelle est la seule qui permette à l'œil d'apprécier avec la plus grande exactitude la couleur des objets et leurs nuances les plus délicates. Très souvent, les architectes tendent à concevoir un projet comme un environnement visuellement compris entre le blanc et le noir. Il est important de mesurer l'importance des couleurs comme une source d'information supplémentaire qui permet à l'observateur de distinguer deux objets qui seraient de forme et de taille identiques. De plus, la couleur affecte de nombreux paramètres physiologiques humains, tels que la tension artérielle, le rythme cardiaque, la respiration, etc.

La figure 2 rappelle la distribution spectrale du rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire la puissance du rayonnement par rapport à sa longueur d'onde. Compris entre 380 et 700 nanomètres, le domaine visible comprend les longueurs d'onde où l'énergie est la plus intense.

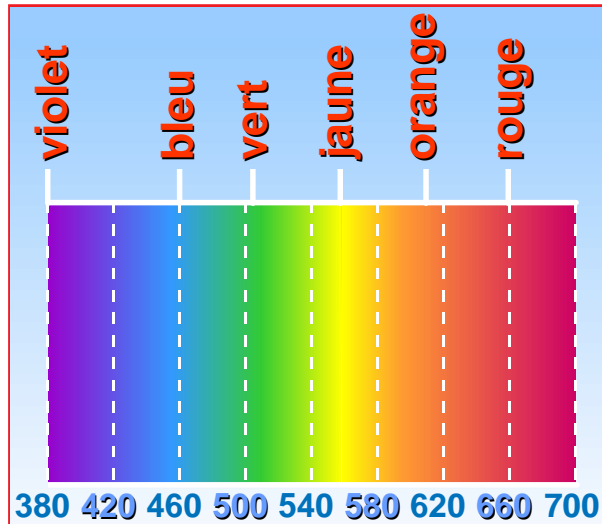
Les rayons X (RX) ont une longueur d'onde de 100 nm. Entre 200 et 380 nm, on trouve les rayonnements ultraviolets. Ils ont une action germicide (UV-C) entre 200 et 280 nm, ils brûlent la peau (UV-B) entre 280 et 315 nm et l'œil (UV-A) entre 315 et 380 nm.

La perception des couleurs dépend de leur longueur d'onde. Le spectre des couleurs perçues s'étend du violet au rouge dans le sens croissant des longueurs d'onde. Dans le domaine visible, la longueur d'onde de 555 nm correspond à la plus grande sensibilité de l'œil et correspond à la zone vert-jaune (sensibilité relative = 1).

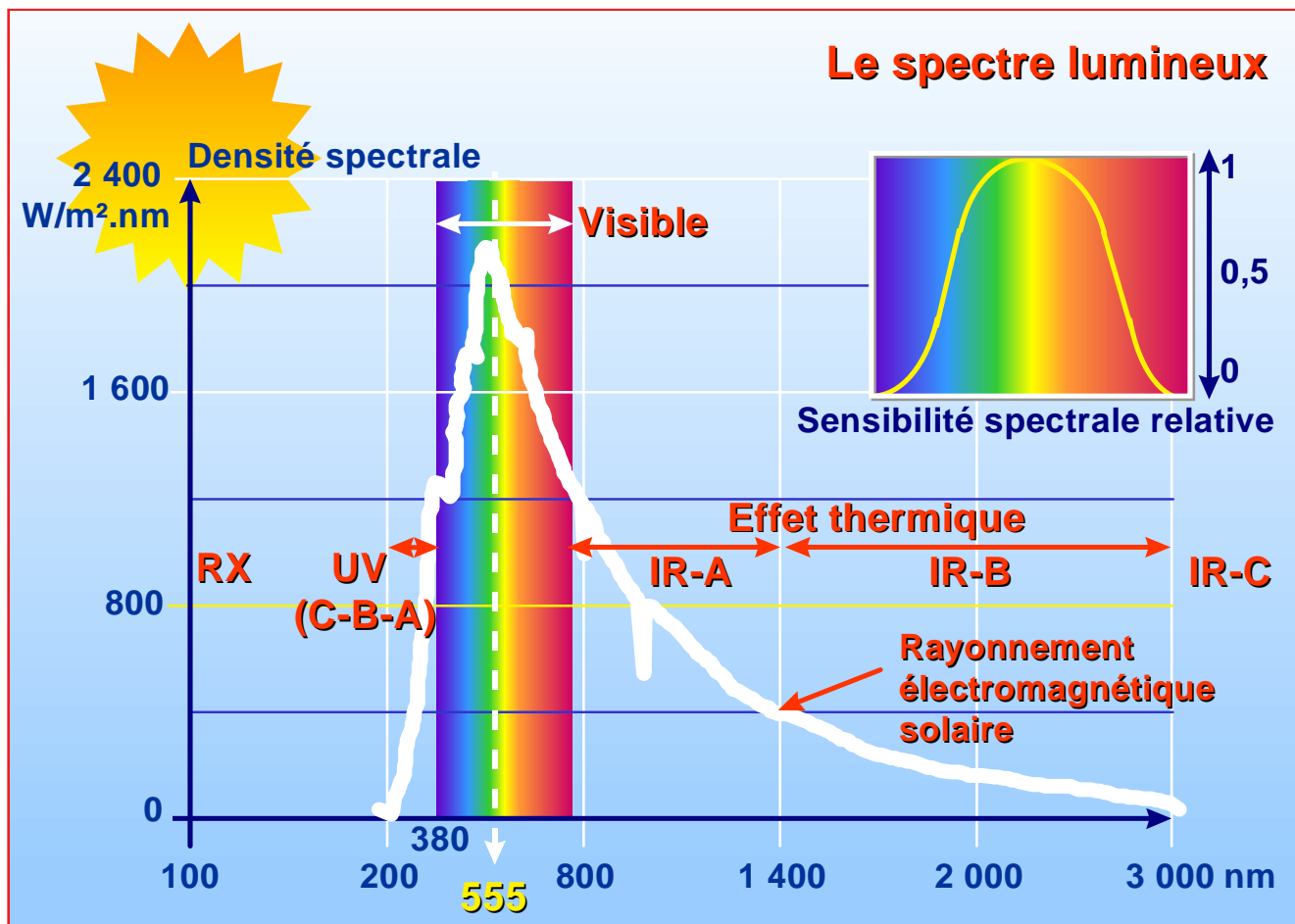
La sensibilité de l'œil aux nuances rouges de longueur d'onde supérieure à 700 nm est faible, ainsi que celle aux violets de longueur d'onde inférieure à 400 nm. L'œil n'est pas sensible aux longueurs d'ondes situées à l'extérieur du domaine visible (sensibilité relative = 0). La courbe de sensibilité spectrale relative (en jaune) reflète donc le filtrage effectué par l'œil, qui attribue à chaque longueur d'onde un poids (de 0 à 1) proportionnel à la sensation visuelle provoquée par cette dernière.

Dans le domaine des plus grandes longueurs d'onde, les infrarouges IR-A (de 760 à 1 400 nm), IR-B (de 1 400 à 3 000 nm) et IR-C (> 3 000 nm) ont un effet thermique uniquement.

Tous les rayonnements électromagnétiques ne sont pas perceptibles par l'œil humain : seuls ceux dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 700 nanomètres provoquent une excitation lumineuse.



Les couleurs dans le spectre lumineux. 1



2 Position du domaine visible dans le rayonnement électromagnétique. Sensibilité spectrale relative.

L'éclairage est l'effet produit par le flux lumineux tombant sur une surface donnée et provenant directement ou indirectement d'une source lumineuse naturelle (le ciel, le soleil) ou artificielle. Il s'exprime en lux (lx).

La luminance caractérise le flux lumineux quittant une surface de l'environnement visuel et se dirigeant vers l'œil de l'observateur (Fig. 1). Elle est exprimée par le quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface. Elle s'exprime en candelas par mètre carré (cd/m^2). La luminance d'une surface est d'autant plus importante que l'éclairage qu'elle reçoit est important et son coefficient de réflexion est proche de 1.

La luminance est la grandeur photométrique qui correspond le mieux à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. L'œil humain perçoit des niveaux de luminance allant de $0,001 \text{ cd}/\text{m}^2$ (vision nocturne où la perception des couleurs est impossible) à $10\,000 \text{ cd}/\text{m}^2$. Par contre, l'œil n'est pas sensible à des variations de luminances inférieures à 20 % : il ne peut que comparer et non mesurer des sensations lumineuses.

Le facteur dominant dans la distinction d'un objet est le contraste de luminances ou de couleurs entre cet objet et son entourage immédiat. Il est plus facile de lire un texte imprimé en noir sur fond blanc qu'en noir sur fond gris. Le contraste des luminances est dans ce cas égal au rapport des coefficients de réflexion de l'encre noire et du support, soit 20/1 dans le premier cas, et de 10/1 à 2/1 dans le second, en fonction du gris utilisé.

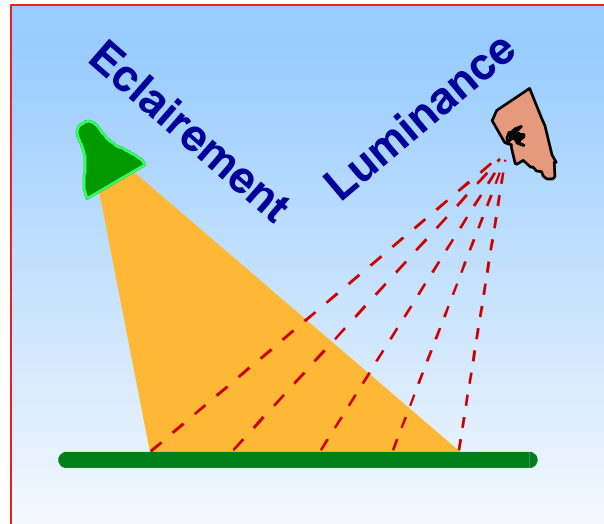
L'éblouissement est l'effet des conditions de vision pour lesquelles l'individu perçoit moins bien les objets suite à des luminances ou à des contrastes de luminances excessifs dans l'espace ou dans le temps. En éclairage naturel, l'éblouissement peut être provoqué par la vue directe du soleil, par une luminance excessive du ciel vu par les fenêtres, ou par des parois réfléchissant trop fortement le rayonnement solaire et provoquant des contrastes trop élevés par rapport aux surfaces voisines. En éclairage artificiel, l'éblouissement peut être provoqué par la vue directe d'une source lumineuse ou par sa réflexion sur les parois polies des luminaires, des surfaces du local ou des objets.

La position des sources lumineuses peut également être la cause d'éblouissement (Fig. 2). Lorsqu'une source de haute luminance se trouve dans le champ visuel, elle provoque un inconfort ou une distraction suivant sa position. Pour éviter un tel inconvénient, la source doit être placée de telle sorte que l'angle qu'elle forme avec l'œil et l'objet regardé soit supérieur à 30° .

La luminance d'une surface est une grandeur difficile à estimer. Comme elle est directement proportionnelle à l'éclairage reçu et au coefficient de réflexion de la surface, la quantité de lumière recommandée pour une tâche visuelle précise s'exprime en termes d'éclairage. Les niveaux d'éclairage requis varient en fonction de la taille du détail à percevoir et des contrastes lumineux entre l'objet et son fond.

La luminance est la grandeur qui correspond le mieux à la sensation visuelle de luminosité d'une surface.

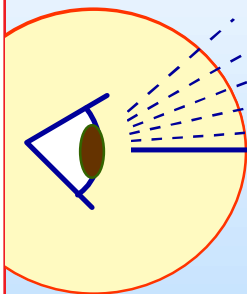
La luminance est le rapport entre l'intensité lumineuse d'une source et sa surface apparente :

$$L = I / S_{app}$$


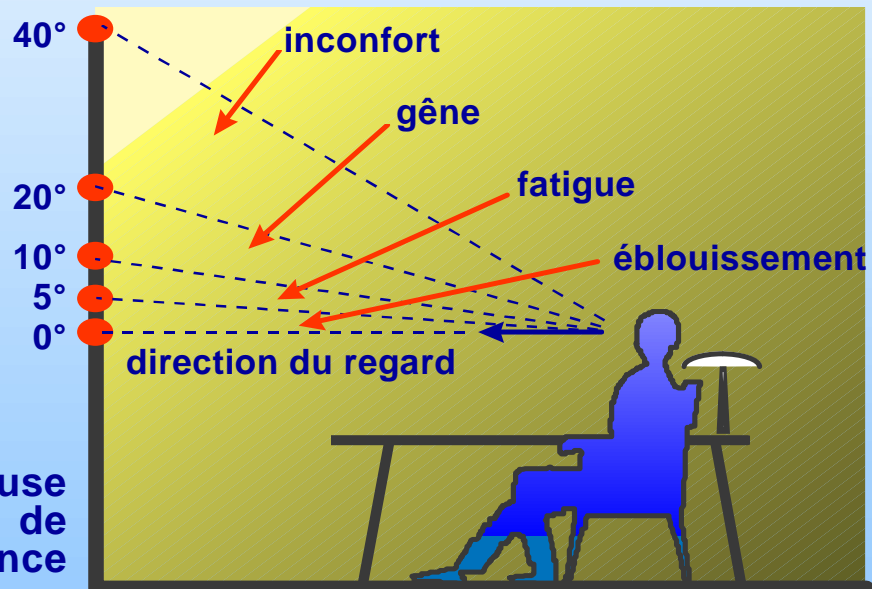
La perception des luminances dépend de l'éclaircement et du coefficient de réflexion de la surface.

Niveau de luminance acceptable :

45°	: 2 500 cd/m ²
35°	: 1 800
25°	: 1 250
15°	: 850
5°	: 580



Luminance et éblouissement



Source lumineuse de haute luminance

2 Confort, niveau de luminance acceptable et position de la source.

En éclairage naturel, les exigences d'éclairément ne se traduisent pas nécessairement en lux mais peuvent s'exprimer en valeur de facteur de lumière du jour (FLJ). Ce facteur est le rapport de l'éclairément intérieur reçu en point du plan de référence (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairément extérieur simultanément sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Il s'exprime en %.

Dans les conditions de ciel couvert, les valeurs du FLJ sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison et de l'heure : elles donnent ainsi une mesure de la qualité intrinsèque du bâtiment à capter la lumière naturelle. On recommande donc des valeurs de FLJ minimum de référence que doit rencontrer tout bâtiment, selon son utilisation, dans des conditions de ciel clair (ciel théorique "normalisé", dont l'éclairément vaut 5 000 lx). Les valeurs recommandées pour le FLJ au fond des locaux sont :

- usines : 5 %
- bureau : 2 %
- salle de cours : 2 %
- salle d'hôpital : 1 %

Pour un éclairément extérieur par ciel couvert de 5 000 lx, le niveau d'éclairément intérieur reçu au fond des bureaux doit donc être de 100 lx minimum.

La lumière parvient en un point par une infinité de chemins. L'éclairément naturel en un local comprend trois composantes (Fig. 1 et 2) :

1. La composante du ciel : c'est l'éclairément provenant de la partie visible du ciel au point considéré ;

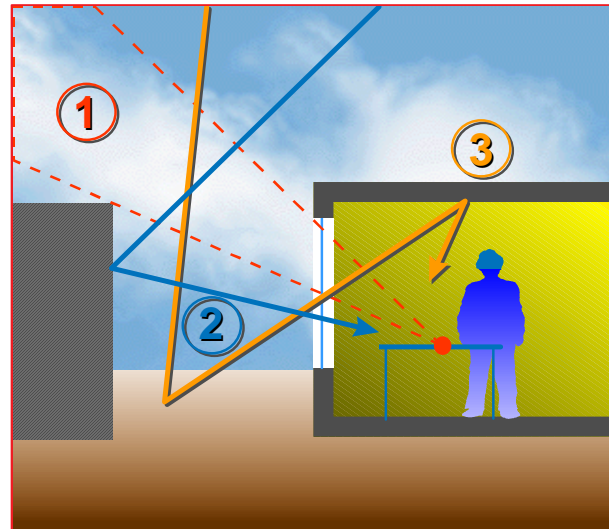
2. La composante réfléchie extérieure : c'est l'éclairément provenant au point considéré par réflexion des rayons lumineux sur les surfaces extérieures ;

3. La composante réfléchie intérieure : c'est l'éclairément provenant au point considéré par réflexion des rayons lumineux sur les surfaces intérieures.

La figure 2 permet d'identifier ces trois composantes. Elle illustre également la variation de FLJ pour une salle de classe de 6 mètres de profondeur par 3 mètres de hauteur, accolée à un couloir avec second jour. La courbe rouge représente la variation du FLJ sans lanterneau, alors que la courbe en pointillé représente l'influence du lanterneau sur l'éclairément en fond de classe. On soulignera que les courbes du FLJ sont valables pour une configuration donnée de fenêtre (ici : un bandeau vitré de 15 m² étendu sur toute la longueur de la salle, soit 8 mètres). Il apparaît donc que l'éclairément en un point varie selon sa position par rapport aux fenêtres.

Pour améliorer le FLJ, il est possible de jouer sur la surface vitrée afin d'augmenter la composante du ciel, sur l'état de surface des matériaux extérieurs pour augmenter la composante réfléchie extérieure ou sur l'état de surface des matériaux intérieurs pour augmenter la réflexion intérieure.

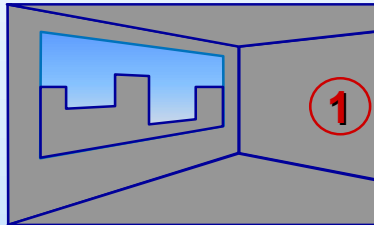
Le facteur de lumière du jour (FLJ) mesure le rapport de l'éclairement intérieur reçu sur le plan de travail et l'éclairement extérieur sur une surface horizontale. Il est constitué de trois composantes et s'exprime en %.



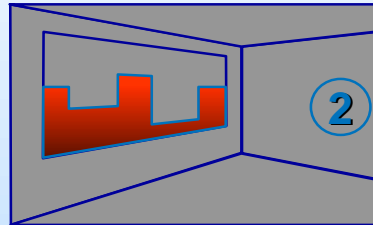
Les trois composantes du FLJ. 1

$$FLJ = \frac{E_{int}}{E_{ext}} (\%)$$

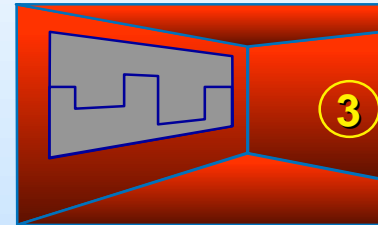
Facteur de lumière du jour



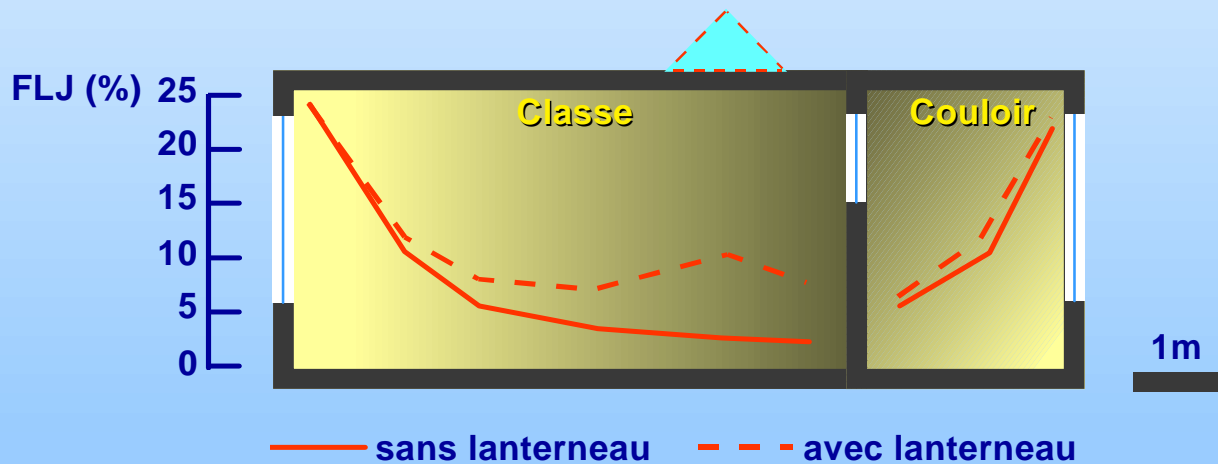
Composante du ciel



Comp. réfléchie ext.



Comp. réfléchie int.



2 Valeurs typiques du FLJ pour une salle de classe.

Certains corps rayonnent de la lumière, d'autres pas. La lumière est émise par des sources naturelles (le soleil, le feu) ou artificielles (les lampes), toutes considérées comme des sources de lumière directe. Les objets non lumineux reflètent une partie du rayonnement lumineux qui les atteint : à ce titre, ils participent également à la répartition et à la diffusion de la lumière. Ce sont des sources de lumière indirecte.

En fait, la lumière n'est visible que parce qu'elle se reflète sur un support matériel. C'est pourquoi l'architecture doit déterminer le type et la quantité des apports de lumière naturelle et artificielle désirés.

La figure 1 illustre l'importance du contrôle de la lumière directe et indirecte. Le Kimbell Art Museum au Texas, de l'architecte L. Kahn, est un extraordinaire exemple de maîtrise de la lumière naturelle. De longs plafonds cycloïdes se fendent pour laisser passer la lumière très dure du soleil texan. Un dispositif de filtrage/réflexion renvoie la lumière sur la surface des voûtes. Le rayonnement direct est transformé en éclairage indirect.

En architecture, la lumière naturelle nous parvient par l'intermédiaire des fenêtres ou après réflexion sur les parois. La taille de la fenêtre détermine la quantité de lumière reçue. Sa position (haute, basse, etc.) et sa forme (verticale, horizontale, etc.) influent sur la diffusion et la répartition de la lumière, de même que l'état de surface des parois (couleur, brillance, etc.). Par conséquent, le type de lumière perçue par l'être humain est directement lié à son environnement architectural.

La figure 2 illustre quelques types d'apports de lumière naturelle, d'après la classification élaborée dans "Daylighting in Architecture" (Baker-Fanchiotti-Steemers). En se basant sur une analyse architecturale, on distingue les espaces d'amenée de lumière, les éléments permettant le passage de la lumière et les systèmes de contrôle de la lumière :

- Les espaces d'amenée de lumière peuvent être des espaces intermédiaires (galerie, porche, serre) ou des espaces de lumière intérieurs (cour intérieure, atrium, conduits de lumière) (Fig. 2-1).

- Les composants permettant le passage de la lumière sont de type latéral (fenêtre, mur-rideau, mur translucide) (Fig. 2-2) ou zénithal (claire-voie, lanterneau, plafond translucide, puits de lumière), (Fig. 2-3) voire global (latéral et zénithal).

- Enfin, il faut considérer la possibilité du contrôle par filtrage de la lumière naturelle (verre translucide, briques de verre, vitraux, protections solaires, claustra, etc.) (Fig. 2-4).

La lumière naturelle peut éclairer un espace de manière directe ou indirecte, latérale ou zénithale. Elle peut également être contrôlée ou filtrée.



Contrôle de l'éclairage direct et indirect dans le Kimbel Art Museum de Fort Worth, Texas (arch. L. Kahn). 1



2 1. Atrium (arch. J. Bouillot) ; 2. Eclairage latéral (arch. F. Nicolas) ; 3. Eclairage zénithal (arch. A. Gaudi) ; 4. Filtrage (arch. Bermond & Porchon).

La stratégie de l'éclairage naturel vise à mieux capter et faire pénétrer la lumière naturelle, puis à mieux la répartir et la focaliser. On veillera également à contrôler la lumière pour éviter l'inconfort visuel. L'utilisation intelligente de la lumière naturelle permet de réduire la consommation électrique consacrée à l'éclairage.

- Capturer :

Une partie de la lumière du jour est transmise par les vitrages à l'intérieur du bâtiment. La quantité de lumière captée dans un local dépend de la nature et du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur et de son état de propreté. L'aménagement des abords peut aussi créer une barrière à la pénétration rasante du rayonnement d'hiver ou d'été, tout en laissant une large ouverture à la lumière du ciel. Inversement, des surfaces réfléchissantes au sol (dallage, plan d'eau) peuvent contribuer à capter davantage de lumière.

- Pénétrer :

La pénétration de la lumière dans un bâtiment produit des effets de lumière très différents non seulement suivant les conditions extérieures (type de ciel, trouble atmosphérique, saison, heure du jour et dégagement du site) mais aussi en fonction de l'emplacement, l'orientation, l'inclinaison, la taille et le type des vitrages. L'éclairage latéral fournit une lumière dirigée, qui souligne généralement le relief, mais limitée en profondeur, contrairement à l'éclairage zénithal qui est beaucoup plus uniforme, mais possible qu'au dernier niveau des bâtiments.

- Répartir :

La lumière se réfléchit d'autant mieux sur l'ensemble des surfaces intérieures des locaux que le rayonnement ne rencontre pas d'obstacles dus à la géométrie du local ou au mobilier, et que les revêtements des surfaces sont mats et clairs. Elle peut également être diffusée par le type même du vitrage utilisé (translucide) ou par des systèmes de réflecteurs, qui permettent à la lumière de gagner le fond du local.

- Protéger et contrôler :

La pénétration excessive de lumière naturelle peut être une cause de gêne visuelle (éblouissement, fatigue). Elle peut se contrôler par la construction d'éléments architecturaux fixes (surplombs, bandeaux lumineux ou lightshelves, débords de toiture, etc.) associés ou non à des écrans mobiles (marquises, volets, persiennes ou stores).

- Focaliser :

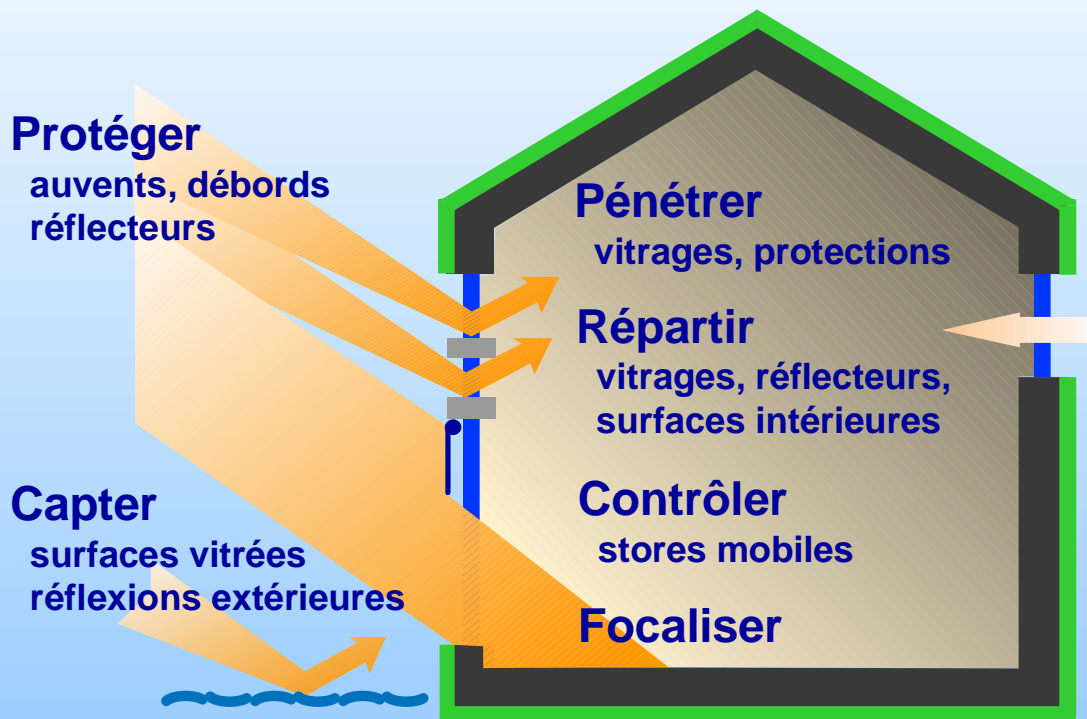
Il est parfois nécessaire de focaliser l'apport de lumière naturelle pour mettre en valeur un lieu ou un objet particulier. Un éclairage zénithal - ou latéral haut - crée un contraste lumineux important avec l'éclairage d'ambiance, moins puissant. Un atrium au centre d'un bâtiment permet aussi à la lumière du jour de mieux pénétrer dans le bâtiment tout en créant un espace de circulation et de repos attrayant. Des bâtiments hauts et profonds peuvent ainsi recevoir la lumière naturelle en leur cœur par le biais de conduits lumineux.

La stratégie de l'éclairage naturel vise à mieux capter et faire pénétrer la lumière naturelle, puis à mieux la répartir et la focaliser. On veillera aussi à contrôler la lumière pour éviter l'inconfort visuel.



Le contrôle de la lumière permet de qualifier l'ambiance (arch. J. Battle). 1

Stratégie de l'éclairage naturel



2 Stratégies d'ouverture et de contrôle de la lumière naturelle.

La couleur et la surface des parois interviennent sur la réflexion de la lumière et des sons. La quantité et la distribution de la lumière et des sons dépendent dans une large mesure de la réflexion des parois. La couleur et le type de surface influencent la température de surface des parois, le confort visuel et peuvent améliorer ou entraver le stockage de la chaleur.

La figure 1 rappelle l'importance de la couleur dans la création des ambiances lumineuses. L'architecture de L. Barragán au Mexique est célèbre pour la qualité de ses coloris, notamment son rose saturé. Le Corbusier aussi travaillait à partir d'une palette de couleurs qu'il avait progressivement établie.

Les radiations colorées réfléchies par les objets peuvent produire certains effets psychologiques sur le système nerveux. C'est ainsi que les couleurs de grandes longueurs d'onde (rouge, orange) ont un effet stimulant tandis que celles de courtes longueurs d'onde (bleu, violet) ont un effet calmant. Les couleurs intermédiaires (jaune, vert) ont, de même que le blanc, un effet tonique favorable à la concentration. Les couleurs foncées et le gris ont, par contre, une action déprimante.

Les couleurs peuvent aussi contribuer à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. Les couleurs chaudes seront de préférence utilisées dans des locaux de grandes dimensions tandis que les couleurs froides seront choisies pour les locaux de dimensions réduites.

La figure 2 montre d'une part l'évolution de la température (à gauche) en fonction de la couleur de l'enduit (blanc et vert moyen) sur la face externe d'une paroi en béton léger couverte d'un enduit de ciment, orientée au sud, le 15 juin par ciel clair. La température intérieure est fixée par hypothèse à 0 °C. A chaque couleur correspond un coefficient d'absorption solaire qui exprime la fraction absorbée du rayonnement lumineux (et donc solaire) incident :

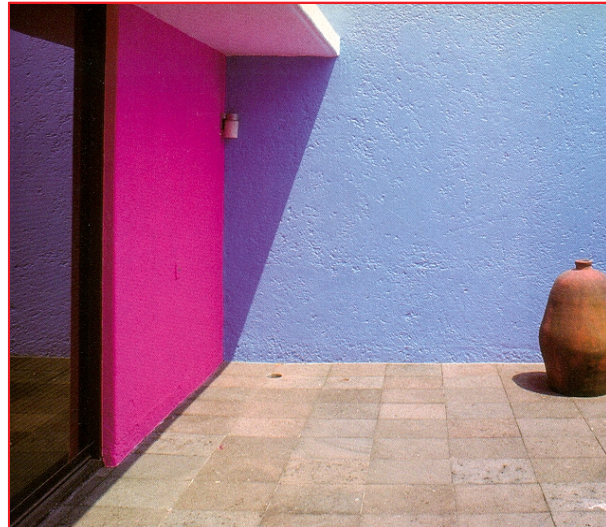
- Coefficient d'absorption solaire du blanc : 0,2.
- Coefficient d'absorption solaire du vert moyen : 0,7.

La différence de température entre les deux surfaces est la plus importante aux alentours de midi : elle atteint 13 °C.

La figure 2 montre également la variation de stockage (à droite) de l'apport solaire au cours du mois de mars, par ciel clair, dans un plancher lourd situé au droit d'une baie vitrée orientée au sud et dont la teinte du revêtement de sol varie (blanc et vert moyen).

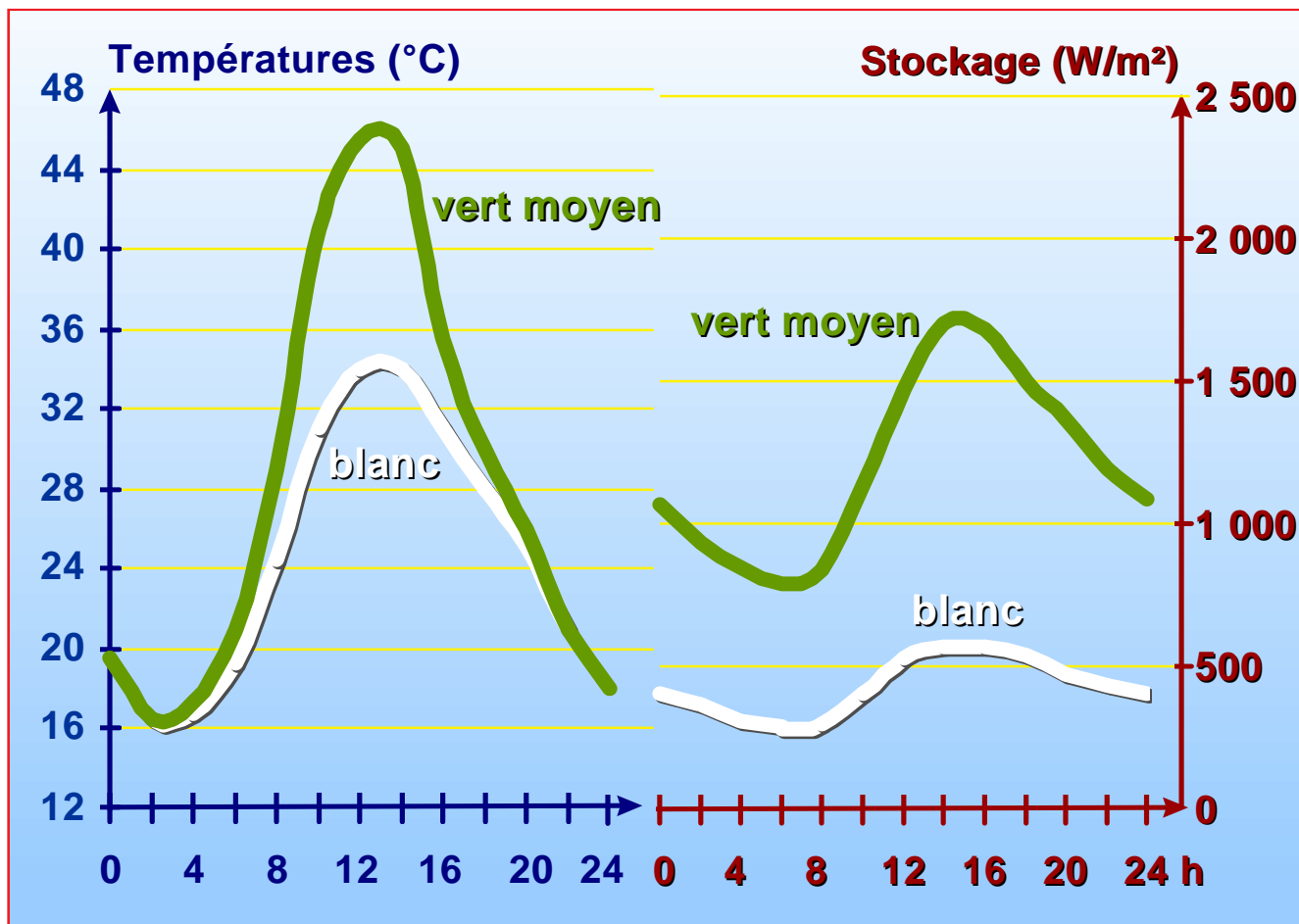
La couleur et la surface des parois interviennent sur la réflexion de la lumière et des sons.

Elles influencent la température de surface des parois en améliorant ou en entravant le stockage de la chaleur.



La couleur est un élément important des ambiances lumineuses (arch. L. Barragán).

1



2 Variation sur 24 heures du stockage de l'apport solaire et des températures de surface selon la couleur des parois.

Le son est une sensation auditive engendrée par la fluctuation périodique de la pression de l'air au niveau de l'oreille. Cette fluctuation peut être caractérisée par son intensité (niveau sonore, en décibel : dB), sa fréquence (comprise entre 20 et 20 000 Hz pour l'être humain) et son timbre (différence qualitative liée à la forme de la vibration).

Les ultrasons ont des fréquences supérieures à 20 000 Hz et ne peuvent être audibles que pour certaines espèces animales, par exemple, le chien qui peut entendre des sons jusqu'à 80 000 Hz.

Le son se propage à une vitesse qui dépend du milieu : dans l'air (bruit aérien) à une température de 20 °C, cette vitesse atteint 343 m/s. Dans l'eau, elle est de 1 170 m/s et peut monter à 5 000 m/s pour la propagation du son via des masses métalliques (bruit d'impact). La clarté du son dépend du chemin parcouru par l'onde sonore : la géométrie du lieu détermine le temps de réverbération, ce qui est primordial, par exemple, pour une salle de concert (Fig. 1).

Les pressions acoustiques rencontrées dans la pratique varient sur une échelle de 1 à 10 millions. Par ailleurs, la sensation auditive est proportionnelle au logarithme de l'excitation (loi de Fechner). La mesure de l'intensité est faite au moyen de l'échelle logarithmique des décibels, qui caractérise le rapport d'une puissance sonore par rapport à une puissance de référence (2 dix-millièmes de Pa, soit la plus faible pression acoustique perceptible par une oreille humaine). Toute augmentation de 20 décibels de l'intensité sonore correspond à une multiplication par 10 de l'amplitude de l'onde. Quelques valeurs : 30 dB = bruissement des feuilles / 50 dB = conversation à voix basse / 70 dB = conversation normale / 90 dB = voyage en train / 110 dB = radio bruyante / 140 dB = seuil de la douleur.

L'exposition au bruit entraîne une diminution de la perception dépendant de l'intensité du bruit, de la durée d'exposition et du type de son (les sons aigus intermittents étant les plus nocifs). L'excès de bruit agit au niveau de l'oreille interne, provoquant un déficit temporaire (fatigue auditive) ou définitif de la sensibilité. Une exposition courte à un bruit très violent (110 dB en discothèque) peut faire perdre définitivement une partie ou la totalité de l'audition.

Le confort sonore dépend du niveau sonore, spécialement en milieu industriel où les machines sont assourdissantes. Il dépend aussi de la sensibilité de l'oreille aux basses fréquences. Des mesures correctrices telles que l'installation de panneaux absorbants peuvent être mises en œuvre pour contrôler ces deux critères.

Le confort acoustique dépend enfin de la dynamique sonore, c'est-à-dire de l'émergence du son sur le bruit de fond (effet de contraste). Un robinet qui fuit le soir peut être aussi inconfortable qu'un train qui passe au lointain. Le confort sonore dans les espaces de bureaux où le niveau sonore est relativement bas dépend davantage de la capacité du bruit de fond à masquer l'émergence de sons particuliers (conversations, etc.) que du niveau sonore.

La figure 2 rassemble les critères de niveau sonore et d'effet de contraste en situant une plage de confort et la position relative de divers bruits courants. Bien qu'ayant un niveau sonore très inférieur, un ronflement peut être ressenti comme aussi inconfortable que le bruit d'un train. Il est également important de noter que l'absence de bruit (dB < 30) n'est pas confortable (anxiogène).

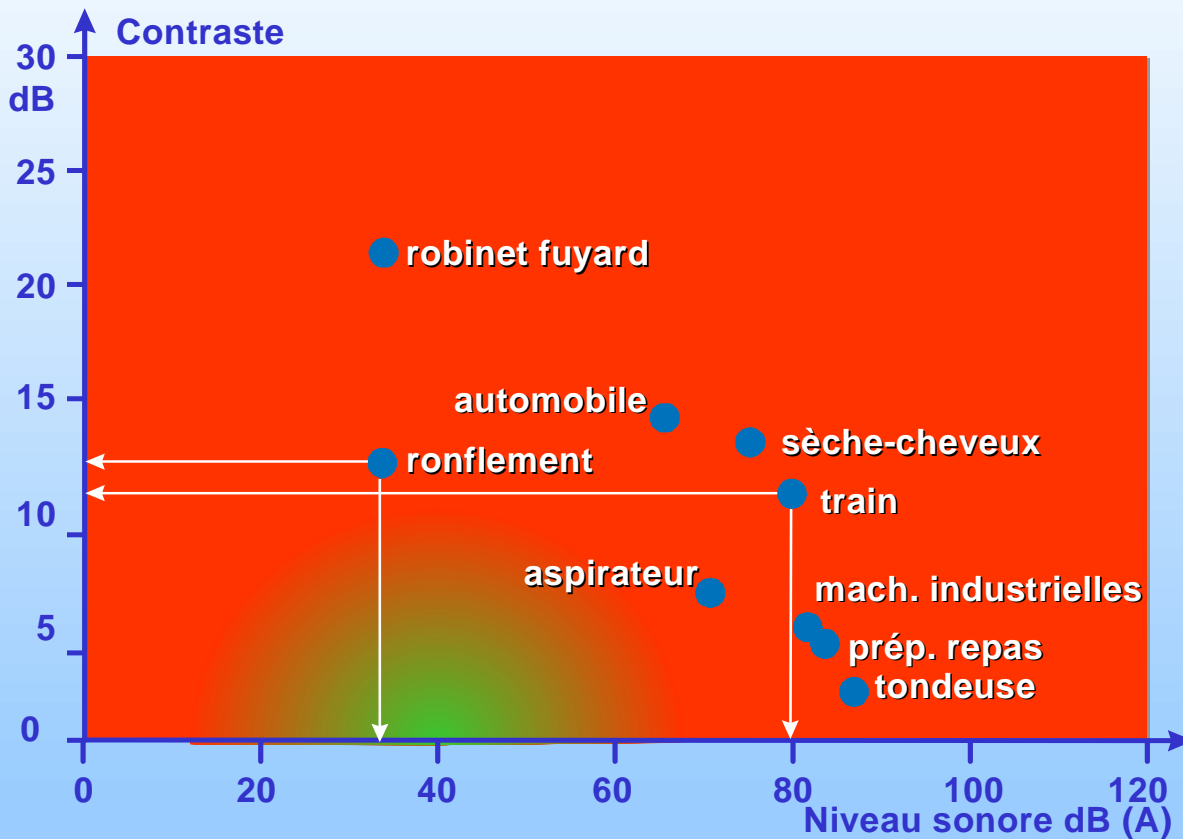
Le confort sonore est déterminé par le niveau d'intensité sonore et le niveau d'émergence dynamique des sons sur leur bruit de fond.



Salle de concert aménagée dans une ancienne bergerie, Villecroze (arch. A. Tsiomis).

1

Confort acoustique



2 Plage de confort sonore (en vert) et bruits courants.

La lutte contre les changements climatiques

Dans le cadre de différents traités internationaux, plusieurs pays se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

La France, signataire de ces accords, s'est fixé comme objectif de réduire la consommation d'énergie des bâtiments tous secteurs confondus, sachant que ceux-ci contribuaient pour plus du quart à l'émission de ces gaz préjudiciables à l'environnement, sous la forme, notamment, de dioxyde de carbone.

La Réglementation thermique 2000

La réglementation thermique ancienne ne permettait pas à la France de parvenir à l'objectif de réduction qu'elle s'était imposée dans le secteur du bâtiment pour atteindre les exigences du protocole de Kyoto (fig. 2). Aussi, il a été décidé une refonte complète de cette réglementation, autorisant également une harmonisation européenne, une meilleure maîtrise des charges financières et une simplification de cette codification.

Cette nouvelle réglementation, la Réglementation thermique 2000 (RT2000), est applicable pour tous les bâtiments neufs (ou transformations importantes) depuis le 1^{er} juin 2001 (permis de construire déposés après cette date). Le secteur de la rénovation n'est pas soumis à cette réglementation, mais il devrait en profiter par un effet "naturel" d'entraînement.

Les grands principes de la RT2000

Pour respecter la RT2000, un bâtiment neuf (tous secteurs confondus) doit satisfaire à trois exigences :

- Sa consommation "toutes énergies" doit être inférieure à celle d'un bâtiment équivalent ayant des caractéristiques thermiques de référence : isolation, système de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, climatisation (bases de calcul à venir), éclairage...

La consommation d'énergie du bâtiment projeté est notée C , et celle du bâtiment référent $C_{\text{réf}}$.

- En été, et si le bâtiment est non climatisé, sa température intérieure conventionnelle devra être inférieure à celle d'un bâtiment équivalent ayant des caractéristiques thermiques de référence (protections solaires, possibilité d'ouvrir les fenêtres...).

La température intérieure conventionnelle du bâtiment projeté est notée T_{ic} (valeur maximale de moyennes calculées sur plusieurs moments d'une journée type d'été), et celle du bâtiment référent $T_{\text{ic réf}}$.

- Les caractéristiques de l'isolation thermique de ses parois, de ses baies, de ses équipements de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, de climatisation, d'éclairage et de protection solaire, seront au moins égales à des caractéristiques thermiques de référence.

Le respect de la réglementation

En fonction du type de professionnel, trois modes d'application sont prévus pour respecter la réglementation :

- vérification par le calcul (solution réservée aux bureaux d'études spécialisées) ;
- application de produits ou de mises en œuvre ayant prouvé leurs performances, et respect des "garde-fous" thermiques (solution simple mais offrant peu de choix) ;
- utilisation de concepts de bâtiments labellisés RT2000 (solution s'adressant notamment aux constructeurs de maison individuelle).

L'évolution de la réglementation

L'exigence des objectifs de performance énergétique liée aux enjeux environnementaux, associée à la nécessaire adaptation du secteur du bâtiment, a conduit le législateur à proposer une réglementation évolutive qui sera, au fil de ses renouvellements (tous les cinq ans), de plus en plus sévère.

La Réglementation thermique 2005 (RT2005), applicable à partir de 2006-2007, se fixe cinq priorités :

- exiger une limite de consommation par rapport au mètre carré construit et par an ;
- introduire une évaluation des émissions de CO_2 liées à la consommation énergétique du bâtiment ;
- poursuivre la valorisation du recours aux énergies renouvelables et mieux prendre en compte la conception bioclimatique ;
- limiter le recours à la climatisation (renforcement des exigences de confort d'été et calcul des consommations de refroidissement) ;
- renforcer les exigences sur certains équipements et matériaux.

La réglementation thermique actuelle résulte de l'enjeu environnemental et de sa prise en compte progressive dans le développement économique.

$$C \leq C_{\text{réf}}$$

$$T_{\text{ic}} \leq T_{\text{ic}} \text{ réf}$$

Respect des "garde-fous" thermiques

Les trois principes de la RT2000. 1

Secteur	Objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre en 2010
Industrie	3,42 Mtec
Transport	4,00 Mtec
Bâtiment	2,66 Mtec
Agriculture et forêts	0,75 Mtec
Déchets	1,10 Mtec
Gaz frigorigènes	1,45 Mtec
Production d'énergie	2,63 Mtec

2 Répartition sectorielle du programme français de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur 10 ans (2000-2010) en millions de tonnes équivalent carbone.

Lorsqu'un matériau est soumis à des différences de température en son sein, il naît un flux de chaleur Φ qui tend à l'équilibre des températures. Ce flux de chaleur dépend de la différence entre les températures et des caractéristiques du matériau :

$$\Phi = c \cdot (T1 - T2).$$

La constante de proportionnalité c dépend de l'épaisseur e de la paroi entre les deux températures données et de la conductivité thermique λ , qui mesure la capacité propre du matériau à conduire la chaleur :

$$c = e/\lambda$$

Par conséquent, plus l'épaisseur du matériau est importante, plus c augmente. Par contre, plus la conductivité thermique diminue, plus c augmente.

La conductivité thermique d'un matériau est égale à la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 K. Elle s'exprime en W/m.K.

La valeur de λ est faible pour les matériaux isolants et importante pour les matériaux conducteurs. Les matériaux sont considérés comme isolants lorsque leur conductivité thermique est inférieure à 0,065 W/m.K. La figure 1 compare l'épaisseur nécessaire pour qu'une paroi en béton armé (2,2 W/m.K) présente les mêmes caractéristiques qu'une paroi idéale en laine minérale (0,04 W/m. K). Les matériaux lourds de maçonnerie ne constituent donc jamais une isolation acceptable.

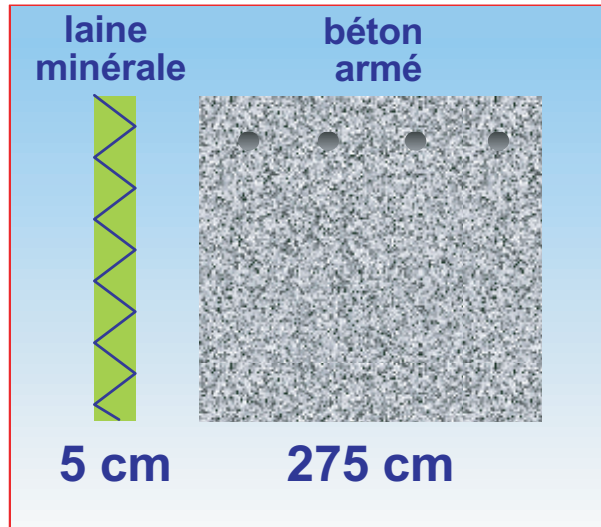
Les facteurs influençant la conductivité thermique d'un matériau sont :

- son poids volumique ;
- sa teneur en eau ;
- la taille de ses pores d'air ;
- la nature du solide les renfermant.

La présence d'eau à l'intérieur du matériau influence sa conductivité thermique. La porosité intrinsèque des matériaux, conjuguée à leur exposition à l'eau, peut faire varier sensiblement leur conductivité thermique. La figure 2 indique, pour quelques matériaux du bâtiment, les valeurs λ en condition sèche et en condition humide. Celle des matériaux isolants n'est donnée qu'en condition sèche car il est déconseillé de les utiliser là où ils pourraient s'humidifier (condensation, vapeur d'eau, etc.). Leur performance isolante décroîtrait alors très sensiblement. Les métaux, matériaux non poreux, ont une conductivité thermique constante.

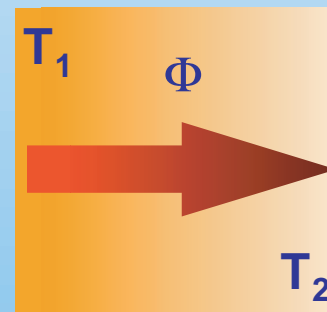
La conductivité thermique λ des matériaux

La conductivité thermique d'un matériau est égale à la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1 K. Elle s'exprime en W/m.K.



1 Compression des épaisseurs de deux matériaux pour obtenir une même résistance thermique.

	sec	hum.		Conductivité thermique λ des matériaux en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 kg/m ³	
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 kg/m ³	
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 kg/m ³	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux	45		acier	
	203		aluminium	
	384		cuivre	



2 Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment.

Flux de chaleur

Lorsque deux faces d'une paroi sont soumises à des différences de température, il naît un flux de chaleur qui tend à l'équilibre des températures. Ce flux de chaleur dépend de la différence entre les températures et du pouvoir isolant de la paroi.

Résistance thermique

Cette capacité isolante de la paroi est définie par un coefficient R, appelé résistance thermique et exprimé en $m^2.K/W$.

Un matériau à fort pouvoir isolant thermique a une résistance thermique élevée (et inversement). Les isolants thermiques peuvent être placés à différents endroits de l'enveloppe, sans incidence sur leurs propriétés. L'emplacement aura cependant une influence sur l'inertie de l'enveloppe et le risque de condensation.

R est l'inverse de la quantité de chaleur passant à travers $1 m^2$ d'un système (ex. : paroi) pour une différence de température de 1 K entre les deux faces de ce système.

Pour une couche thermiquement homogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant à peu près les mêmes valeurs de conductivité thermique (à l'exception des lames d'air), et avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura : $R = e/\lambda$ avec e l'épaisseur de la couche (m) et λ la conductivité thermique ($W/m.K$).

Pour une couche thermiquement hétérogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant des valeurs de conductivité thermique différentes, et avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura :

$R = 1/U - R_{si} - R_{se}$ avec U coefficient de transmission surfacique de la couche, R_{si} la résistance superficielle vis-à-vis de l'intérieur, et R_{se} la résistance superficielle vis-à-vis de l'extérieur.

Coefficient de transmission

À l'inverse de R, U le coefficient de transmission surfacique (unités $W/m^2.K$) mesure l'aptitude d'un système à laisser passer la chaleur.

Il remplace la notation K utilisée dans les précédentes réglementations et s'évalue à l'aide des règles Th-U. De même, le coefficient de transmission linéique, anciennement k et exprimant notamment les déperditions par ponts thermiques, est remplacé par les notations Ψ ($W/m.K$) et χ (W/K), caractérisant respectivement les transmissions linéiques et ponctuelles.

Le calcul du coefficient U fait la distinction entre plusieurs types de paroi :

Parois opaques

Parois donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé

Une telle paroi est uniquement caractérisée par son coefficient intrinsèque U_p et autorise un calcul simple (fig. 2) :

- Paroi sans ponts thermiques intégrés et avec un flux de chaleur perpendiculaire.

$$U_p = 1/(R_{si} + \Sigma R + R_{se})$$

avec ΣR somme des résistances thermiques des différents matériaux de la paroi.

- Paroi avec ponts thermiques intégrés et avec un flux de chaleur perpendiculaire

$$U_p = U_c + (\Sigma_i \Psi_i \times L_i + \Sigma_j \chi_j)/A$$

avec L_i = linéaire du pont thermique de la liaison i.

Parois en contact avec le sol ou donnant sur un vide sanitaire ou un sous-sol non chauffé

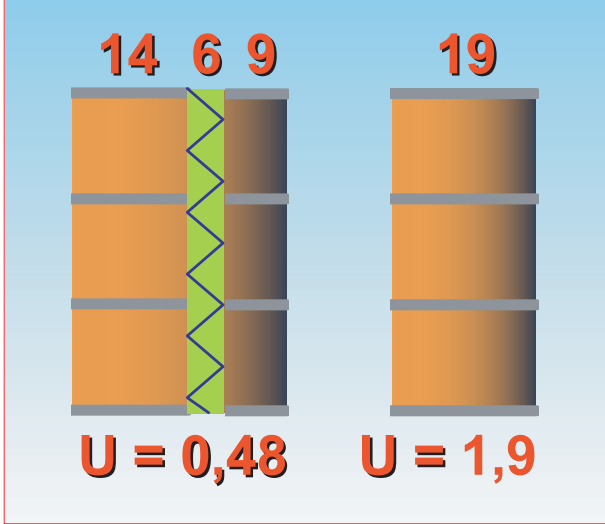
Les déperditions de ce type de paroi sont exprimées à l'aide d'un coefficient de transmission surfacique "équivalent" U_e évalué en fonction des caractéristiques propres de la paroi et de son environnement (qui induit un facteur de pondération dépendant de différents paramètres).

Parois vitrées

Le coefficient U d'une paroi vitrée est calculé de la manière suivante : prise en compte d'un coefficient U spécifique à la partie courante du remplissage, d'un coefficient Ψ concernant la jonction entre la menuiserie et l'élément de remplissage, d'un coefficient U moyen pour la menuiserie.

Les caractéristiques thermiques des parois R et U

Les coefficients R et U mesurent les caractéristiques thermiques d'une paroi. R indique la propriété à s'opposer à la déperdition de chaleur et s'exprime en m².K/W. U mesure son aptitude à laisser passer la chaleur. Il s'exprime en W/m².K

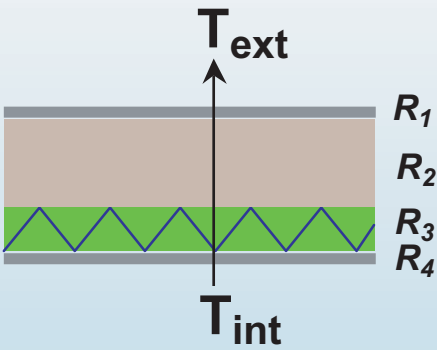


Coefficients U pour une paroi isolée (6 cm de laine minérale) et non isolée (brique 1 200 kg/m³). **1**

Mur sans pont thermique

$$U_p = 1 / (R_{si} + \Sigma R + R_{se})$$

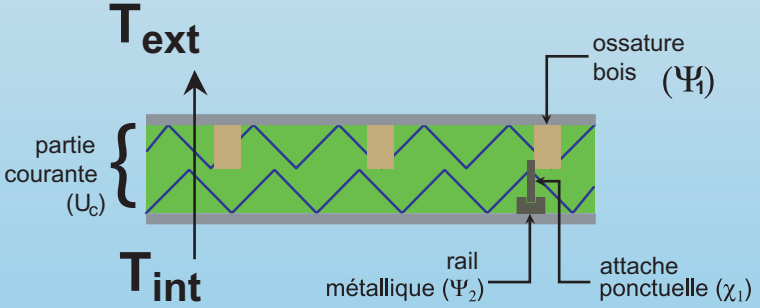
avec $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$



Mur avec pont thermique

$$U_p = U_c + \frac{(\Sigma_i \Psi_i \times L_i + \Sigma_j \chi_j)}{A}$$

avec A aire de la paroi (m²)
 $U_c = 1 / (R_{si} + \Sigma R + R_{se})$



2 Calcul de U pour cas courants.

Définition

En remplacement des coefficients GV (résidentiel) et G1 (non résidentiel) de l'ancienne réglementation, la RT2000 crée un nouveau coefficient pour caractériser l'isolation du bâtiment: $U_{bât}$. Il s'agit du coefficient de transmission surfacique moyen de l'enveloppe séparant l'intérieur de la construction de l'extérieur, d'un local non chauffé ou du sol.

Exprimé en $W/m^2.K$, $U_{bât}$ représente donc les déperditions moyennes par m^2 de paroi pour 1 degré d'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Principe

$U_{bât}$ intègre les ponts thermiques et prend en compte les pertes vers les locaux non chauffés. Mais il est indépendant de la ventilation, traité de façon détaillée par ailleurs.

Cette notion de déperdition thermique de l'enveloppe est une grandeur couramment utilisée en Europe.

La réglementation introduit également un coefficient $U_{bât\ ref}$ permettant de fixer des performances minimales : ainsi un bâtiment à usage d'habitation ne devra pas avoir un coefficient $U_{bât}$ supérieur de plus de 30 % au coefficient de référence. Cette dernière valeur dépend uniquement de la zone climatique où se situe le projet et de la surface des différents types de paroi du bâtiment (murs, toit, parois vitrées, etc.). Elle ne dépend pas de l'énergie utilisée pour le chauffage, ce qui constitue un changement par rapport à la réglementation précédente.

Calcul

Ce coefficient se calcule comme la valeur moyenne des coefficients surfaciques et linéiques des éléments de l'enveloppe, pondérés par leurs surfaces ou leurs linéaires correspondant. Les formules exactes sont données dans les règles Th-U.

$U_{bât} = H_T / A_T$ (formule générale) avec :

A_T : surface intérieure totale des parois qui séparent le volume chauffé de l'extérieur, du sol et des locaux non chauffés (m^2).

H_T : coefficient de déperdition par transmission entre le volume chauffé, d'une part, et l'extérieur, le sol et les locaux non chauffés, d'autre part (W/K).

$H_T = H_D$ (transmission directe vers l'extérieur) + H_S (vers le sol) + H_U (vers locaux non chauffés) (fig. 2)

$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k L_k \Psi_k + \sum_j \chi_j$ avec :

A_i : surface intérieure de la paroi i (m^2)

U_i : coefficient de transmission thermique de la paroi i ($W/m^2.K$)

L_k : linéaire du pont thermique de liaison k (m)

Ψ_k : coefficient de transmission thermique du pont thermique de liaison ($W/m.K$)

χ_j : coefficient de transmission thermique ponctuel du pont thermique tridimensionnel (W/K)

$H_S = \sum_i A_i U_{ei} + \sum_j A_j U_{ej} b_j$ (cas des parois en contact direct avec le sol) avec :

A_i : surface intérieure de la paroi i en contact avec un sol donnant sur l'extérieur (m^2)

A_j : surface intérieure de la paroi j donnant sur un local non chauffé (m^2)

U_{ei} : coefficient de transmission thermique équivalent de la paroi i en contact avec un sol donnant sur l'extérieur ($W/m^2.K$)

U_{ej} : coefficient de transmission thermique équivalent de la paroi j donnant sur un local non chauffé ($W/m^2.K$)

b_j : coefficient de réduction de la température

$H_S = \sum_k A_k U_{ek}$ (cas des parois donnant sur un vide sanitaire ou un sous-sol non chauffé) avec :

A_k : surface intérieure de la paroi k (m^2)

U_{ek} : coefficient de transmission thermique équivalent de la paroi k ($W/m^2.K$)

$H_U = \sum_l H_{lu} b_l$ (pour chaque local) avec :

H_{lu} : coefficient de déperdition par transmission du volume chauffé vers le local non chauffé



b_l : coefficient de réduction de température, tel que $b = (T_i - T_u) / (T_i - T_e)$



T_i : température intérieure

T_e : température extérieure

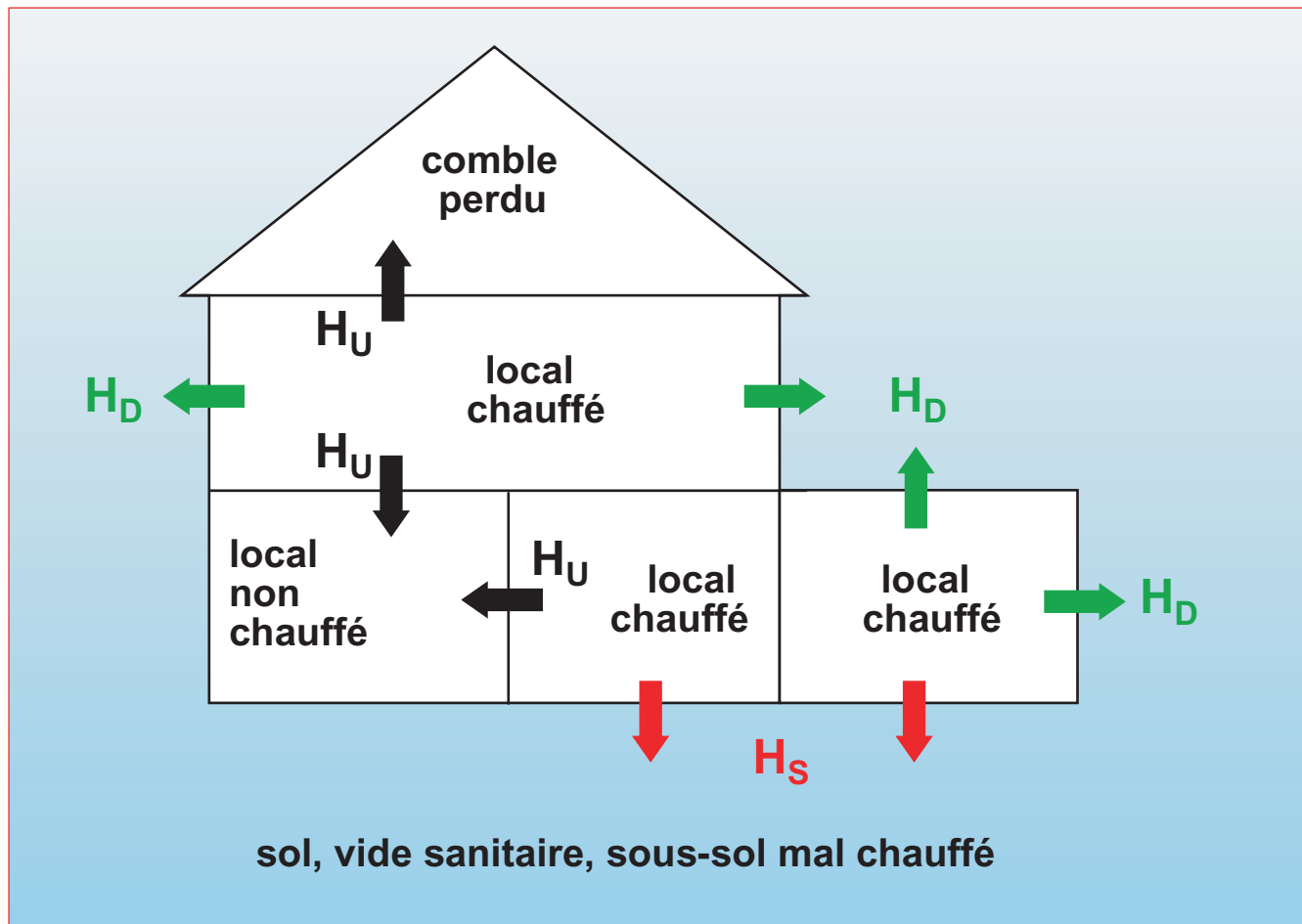
T_u : température local non chauffé

$U_{bât}$ (W/m².K) =
**déperditions moyennes
 par m² de paroi
 pour 1 degré d'écart
 de température entre
 l'intérieur et l'extérieur.**

 } 19 tonnes de CO₂/an émises
 134 000 kWh/an d'énergie primaire consommés
 **Maison non isolée 100 m²**

 } - 71 % 13,6 tonnes de CO₂ /an évitées
 90 400 kWh/an d'énergie primaire non consommés/an
 **Maison bien isolée 100 m²**

Importance de l'isolation de l'enveloppe dans la lutte des émissions de CO₂ et dans la réduction des consommations d'énergie (d'après Isover.) **1**



2 Typologie des déperditions thermiques.

Définition

La consommation conventionnelle d'énergie d'un bâtiment pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et pour les bâtiments non résidentiels, l'éclairage des locaux, s'exprime sous la forme d'un coefficient nommé C.

Ce coefficient est calculé annuellement en adoptant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone H1, H2 et H3 (fig. 1), et en cumulant les quantités d'énergie consommée selon les modalités de calcul définies dans la méthode de calcul Th-C.

Les unités de ce coefficient sont le kilowattheure d'énergie primaire (kWh-ep).

Principe

La consommation C du bâtiment projeté doit être inférieure ou égale à une consommation de référence, notée $C_{réf}$.

Calcul

C et $C_{réf}$ sont calculés conjointement, avec les données du projet pour C, et avec les caractéristiques thermiques de référence pour $C_{réf}$ (définies par la loi).

Le mode de calcul, non conçu pour être appliqué manuellement, est le suivant (fig. 2):

- 1 - Positionnement du projet dans sa zone climatique spécifique.
- 2 - Caractérisation de l'enveloppe du projet: surfaces des parois déperditives, surface chauffée du bâtiment, coefficient $U_{bât}$, perméabilité à l'air, apports solaires et inertie thermique.
- 3 - Définition des zones: le bâtiment est divisé en zones ayant des "usages thermiques" différents.
- 4 - Choix de la température intérieure de consigne: cette température peut être variable en fonction de plusieurs facteurs (jour/nuit, semaine/week-end, occupation, etc.).
- 5 - Ventilation: précision des débits de renouvellement d'air souhaités, prise en compte des apports dus aux échangeurs de chaleur et de la consommation des appareils.
- 6 - Besoins en chauffage pour chaque zone: calcul indépendant du mode de générateur et d'énergie choisis et prenant en compte les différents apports de chaleur (dont les apports solaires).
- 7 - Besoins en ECS pour chaque zone.
- 8 - Pertes de distribution de l'ECS: évaluation des pertes dues au circuit de distribution, des consommations des auxiliaires de distribution (pompes) et des pertes récupérables.
- 9 - Pertes de stockage de l'ECS: avec prise en compte des pertes récupérables pour le chauffage.
- 10 - Pertes dues aux dos des émetteurs et au circuit de distribution de chauffage: avec prise en compte des consommations des auxiliaires de distribution (pompes, ventilateurs).
- 11 - Génération (ensemble de générateurs, fournissant conjointement de la chaleur pour un ou plusieurs usages): calcul des pertes nettes de génération et de la consommation des auxiliaires.
- 12 - Consommation de chauffage, d'ECS et d'auxiliaires du bâtiment: sommation des besoins et des pertes.

Consommation de chauffage (Wh) = Besoins de chauffage + Pertes au dos des émetteurs + Pertes nettes de distribution + Pertes nettes de génération

Consommation d'ECS (Wh) = Besoins d'ECS + Pertes de distribution + Pertes de stockage + Pertes de génération

13 - Consommation d'énergie pour l'éclairage (secteur non résidentiel uniquement)

14 - Consommation C: somme des consommations de chauffage, d'ECS, d'éclairage (cf. § 13) et d'auxiliaires de l'ensemble du bâtiment, associées à un facteur pour transformer ces valeurs en énergie primaire.

Dans l'attente du procédé de calcul intégrant les consommations d'énergie dues au refroidissement des bâtiments climatisés, cette méthode ne prend pas en compte ces consommations.

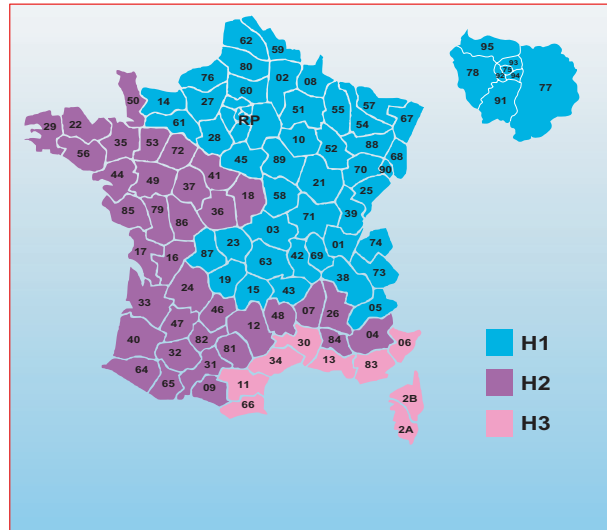
Labels

Deux labels allant au-delà de la réglementation ont été institutionnalisés pour orienter le secteur du bâtiment vers plus de performance:

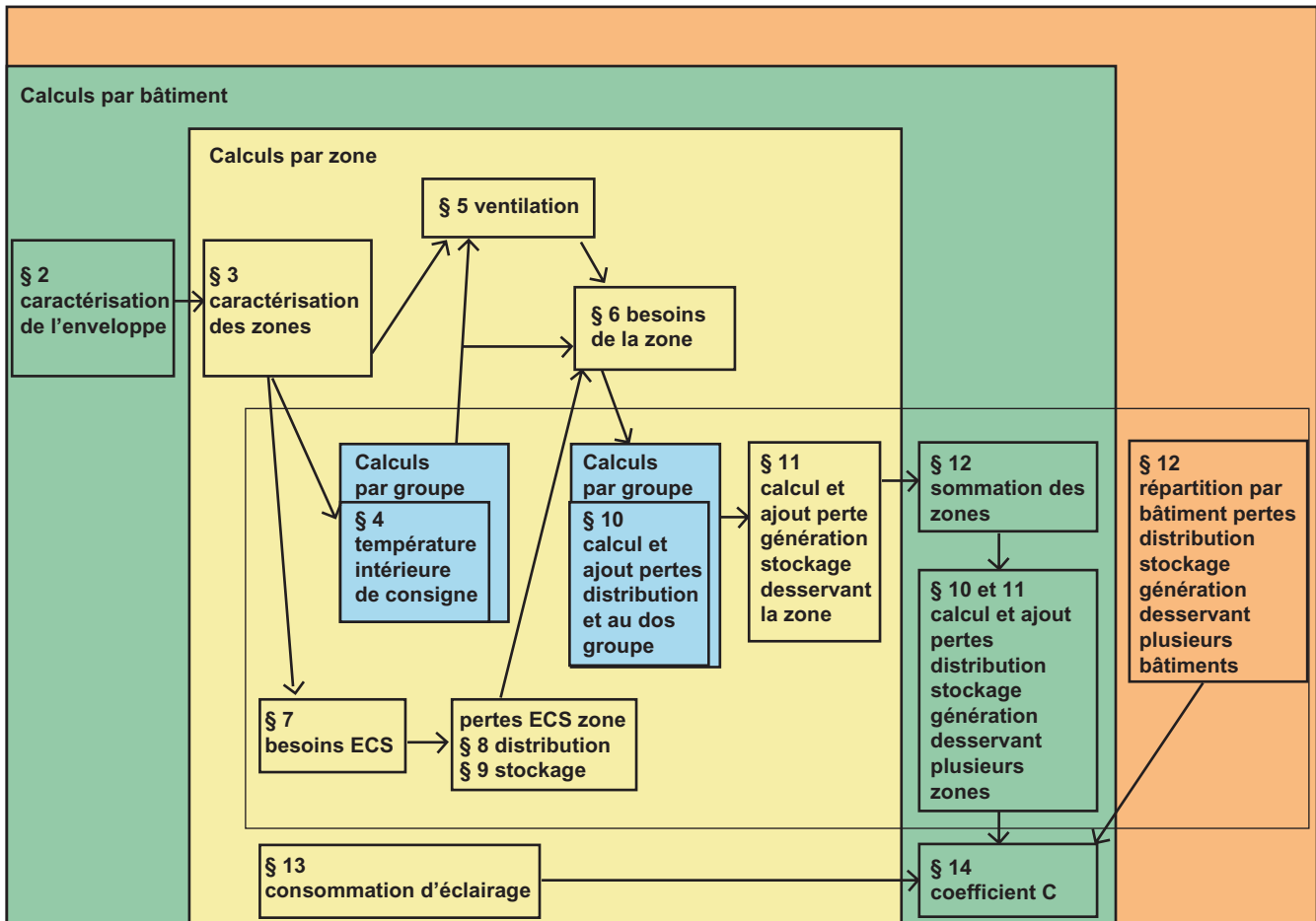
Label haute performance énergétique (HPE), qui correspond à une consommation inférieure de 8 % à la consommation de référence.

Label très haute performance énergétique (THPE), qui correspond à une consommation inférieure de 15 % à la consommation de référence.

**C (kWh-ep) =
consommation d'énergie
pour le chauffage,
la ventilation,
la climatisation,
la production d'eau chaude
sanitaire et l'éclairage
des locaux.**



Zones climatiques d'hiver. 1



2 Principe de calcul du coefficient C. (RT2000, guide réglementaire, version 2004.)

Définition

La température intérieure conventionnelle atteinte en été par un bâtiment non climatisé, noté T_{ic} , est la valeur maximale de la moyenne sur trois heures consécutives de la température opérative.

Elle est calculée en adoptant des données climatiques conventionnelles pour chaque zone E_a , E_b , E_c et E_d (fig. 1).

Les modalités de calcul de T_{ic} sont définies dans la méthode de calcul Th-E.

Les unités de T_{ic} sont le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Principe

La température intérieure conventionnelle T_{ic} du bâtiment projeté doit être inférieure ou égale à une température intérieure conventionnelle de référence, notée $T_{ic\text{ réf}}$.

Cette exigence dans le domaine du confort d'été est une nouveauté par rapport aux anciennes réglementations. L'objectif de cette mesure est de démontrer qu'il est possible d'obtenir un confort satisfaisant sans recourir à la climatisation.

Dans le cas de bâtiments climatisés, ce principe de la RT2000 ne s'applique pas. Ces derniers feront l'objet d'un traitement spécifique lors de la prochaine réglementation.

Calcul

T_{ic} et $T_{ic\text{ réf}}$ sont calculées conjointement, avec les données du projet pour T_{ic} , et avec les caractéristiques thermiques de référence pour $T_{ic\text{ réf}}$ (définies par la loi).

$T_{ic\text{ réf}}$ doit être au minimum égale à $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ (si le calcul conduit à une valeur inférieure, cette dernière n'est donc pas à prendre en compte).

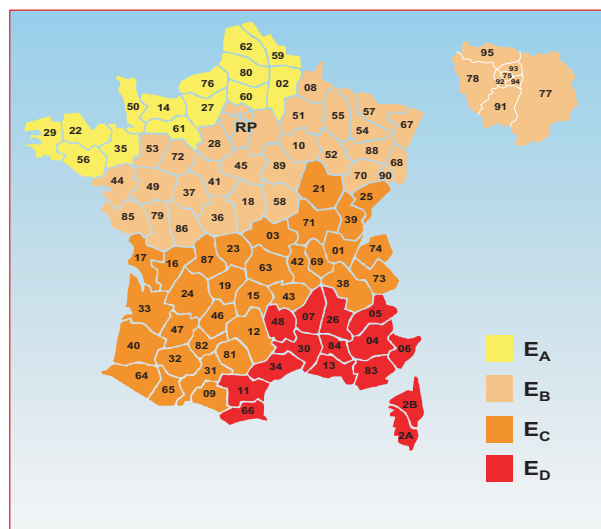
Le mode de calcul, non conçu pour être appliqué manuellement, prend en compte les paramètres suivants et s'opère sur une journée chaude de référence :

- 1 - Positionnement géographique du projet (prise en compte des données climatiques).
- 2 - Inertie du bâtiment ou de ces différentes zones (amortissement des variations de température) : très légère, légère, moyenne, lourde ou très lourde. L'inertie du bâtiment est calculée au moyen des règles Th-I.
- 3 - Apports internes.
- 4 - Capacité du bâtiment à être ventilé (ouverture "classique" des fenêtres ou utilisation de systèmes spécifiques).
- 5 - Exposition des baies au bruit (permet de définir si le bâtiment peut être ventilé naturellement). Définition de 3 classes d'exposition : BR1 (calme), BR2 (pas de possibilités de ventilation nocturne car niveau sonore trop élevé) et BR3 (traitement acoustique imposé).
- 6 - Orientation et protection solaire des baies (prise en compte des apports solaires). La protection solaire des baies est caractérisée par le facteur solaire S , ratio entre l'énergie solaire entrant dans le local et celle arrivant sur la baie. Le facteur solaire du bâtiment est calculé au moyen des règles Th-S.

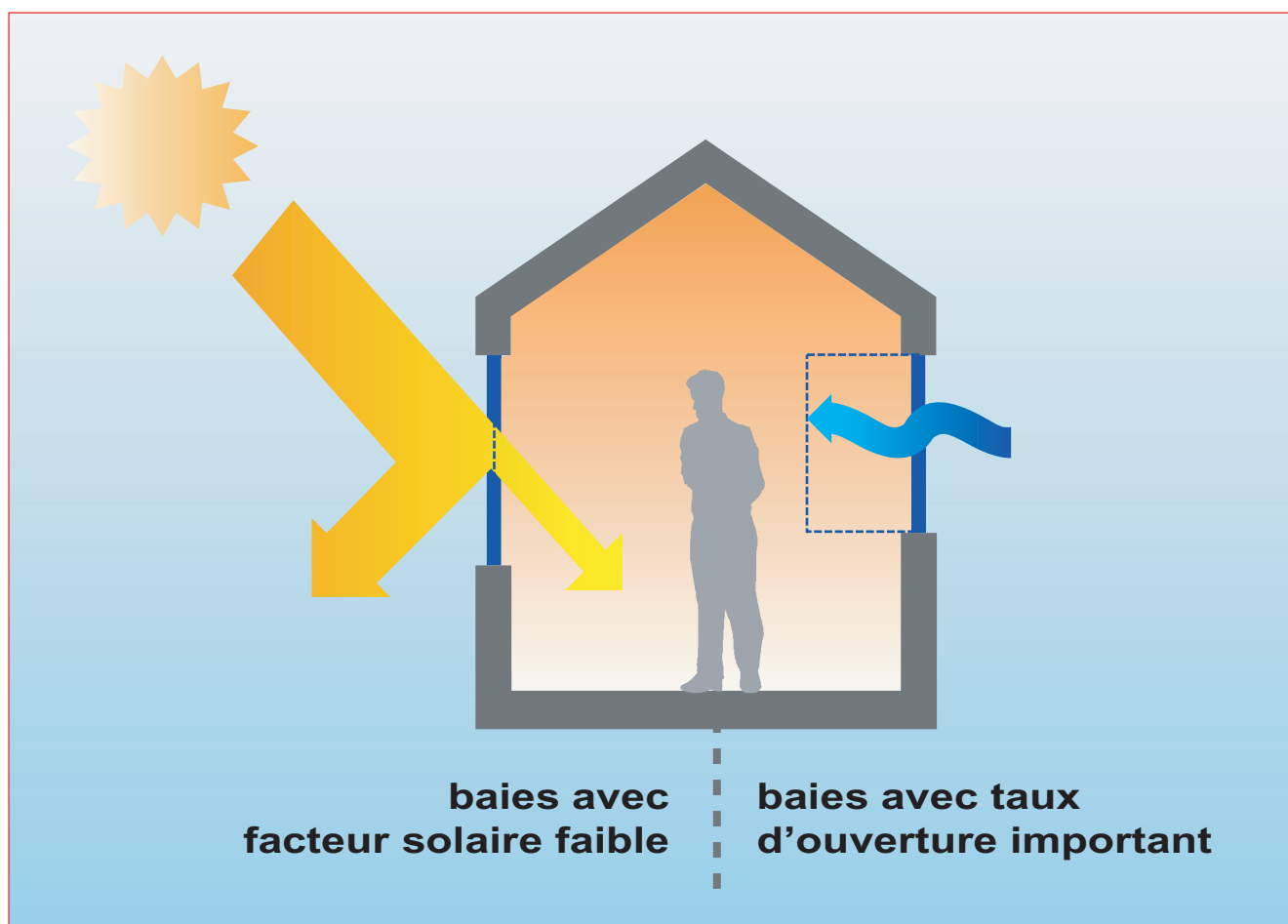
Méthode simplifiée

Rappel : il n'est pas obligatoire de calculer T_{ic} et $T_{ic\text{ réf}}$ pour vérifier la conformité du bâtiment par rapport à la RT2000. On pourra, par exemple et plus simplement, vérifier que le facteur solaire des baies utilisées est bien inférieur aux valeurs de référence (protection solaire), et qu'elles présentent bien un taux d'ouverture minimum (ventilation naturelle) (fig. 2).

Pour la première fois,
une exigence est portée
sur le confort d'été :
 $T_{ic} \leq T_{ic\text{ réf}} \leq 26\text{ °C}$.



Zones climatiques d'été. 1



2 Les 2 paramètres essentiels de prise en compte du confort d'été. Ce schéma illustre strictement une exigence réglementaire et non des dispositifs architecturaux pour y parvenir.

Les 7 domaines d'exigence

Les caractéristiques thermiques minimales exigibles sur un bâtiment respectant la RT2000 portent sur sept domaines :

- l'isolation thermique ;
- les apports de chaleur solaire (en confort d'été) ;
- la ventilation ;
- le chauffage ;
- l'eau chaude sanitaire ;
- l'éclairage (domaine réservé aux bâtiments du secteur tertiaire) ;
- la climatisation.

Pour chacun de ces domaines, les différentes cibles pour parvenir aux performances souhaitées sont :

L'isolation thermique

- Le coefficient U des différentes parties (murs, toiture, plancher, baies) de l'enveloppe du bâtiment devra être inférieur à des valeurs maximales réglementaires (fig. 1).
- Dans le cas de bâtiment à usage d'habitation, le coefficient $U_{\text{bât}}$ ne pourra pas excéder de plus de 30 % le coefficient $U_{\text{bât réf.}}$.
- Les ponts thermiques devront présenter un coefficient Ψ inférieur à des valeurs maximales réglementaires (fig. 2). Les rupteurs de ponts thermiques permettent de réduire de 85 % les déperditions thermiques qui se font entre la jonction mur-plancher. Le rupteur est constitué d'un corps isolant traversé par des armatures métalliques assurant la liaison structurelle. L'isolant doit être, dans certains cas, associé à un dispositif associant propriétés coupe-feu et acoustique.

Les apports de chaleur solaire

- Un bâtiment non climatisé et destiné au sommeil devra avoir un facteur solaire des baies inférieur ou égal au facteur solaire de référence (limite de l'échauffement).
- Un bâtiment non climatisé devra avoir des baies dotées d'un pourcentage minimum de parties ouvrantes (ventilation naturelle).
- Un bâtiment climatisé et à usage autre que d'habitation devra avoir un ratio d'ouverture solaire équivalente (ratio caractérisant les baies fonction de la surface, du facteur solaire et de l'effet de masque) inférieur ou égal à des valeurs maximales réglementaires.
- Un bâtiment climatisé et à usage d'habitation devra avoir un facteur solaire moyen des baies inférieur ou égal à des valeurs maximales réglementaires.

La ventilation

- Les équipements devront être équipés de dispositifs de réglage, de régulateur de débit et de temporisateur, en fonction notamment de la modification de l'ambiance et de l'utilisation des locaux.
- Les réseaux de ventilation devront être isolés, s'il s'avère que le fluide transporté peut être soumis à des échanges thermiques au cours de son parcours.
- Si un bâtiment à usage autre que d'habitation comporte des

locaux à "comportement" thermique différent, ceux-ci devront être servis par des systèmes indépendants.

- Si un bâtiment à usage autre que d'habitation à une surface chauffée de plus de 400 m², il devra posséder un dispositif permettant de mesurer la durée de fonctionnement des centrales de ventilation.

Le chauffage

- Interdiction des chaudières gaz à veilleuse.
- Les systèmes devront posséder une régulation automatique en fonction de la température des locaux chauffés, et dans certains cas des dispositifs de réglage ou de programmation ainsi que de régulation en fonction de la température extérieure.
- Les réseaux de chauffage devront être isolés, s'il s'avère que le fluide transporté peut être soumis à des échanges thermiques au cours de son parcours.
- Si un bâtiment à usage autre que d'habitation à une surface chauffée de plus de 400 m², il devra posséder un dispositif permettant le comptage des consommations et la mesure des températures des locaux chauffés.

L'eau chaude sanitaire

- Les chauffe-eau électriques à accumulation devront présenter une capacité minimale de maintien de la température de l'eau.
- Les accumulateurs gaz et les chauffe-bains devront avoir des performances minimales.
- Les réseaux de distribution d'ECS devant être maintenus en température devront être isolés.
- Si un bâtiment comporte un système d'accueil pour le sommeil (+ 40 lits) ou pour la restauration (+ 200 repas), il devra posséder un dispositif permettant le comptage des consommations d'ECS.

L'éclairage

- Système de réglage et de commande facilement accessible.
- Les sources d'éclairage artificiel situées à moins de 4 m d'une baie doivent être commandés séparément.
- L'éclairage naturel suffisant doit interdire le recours à l'éclairage artificiel automatique.
- Si une surface éclairée dépasse 1 000 m², un dispositif doit permettre le comptage des consommations.

La climatisation

- Dans le cas d'un bâtiment à usage autre que d'habitation, les accès doivent être équipés de systèmes de fermeture automatique, et les locaux doivent être pourvus de dispositifs spécifiques de ventilation.
- Systèmes équipés de réglages manuel et automatique, ainsi que – dans certains cas – de comptage des consommations.
- Interdiction de chauffer un air refroidi, ou inversement, sauf dans le cas où le chauffage serait assuré par récupération sur la production de froid.

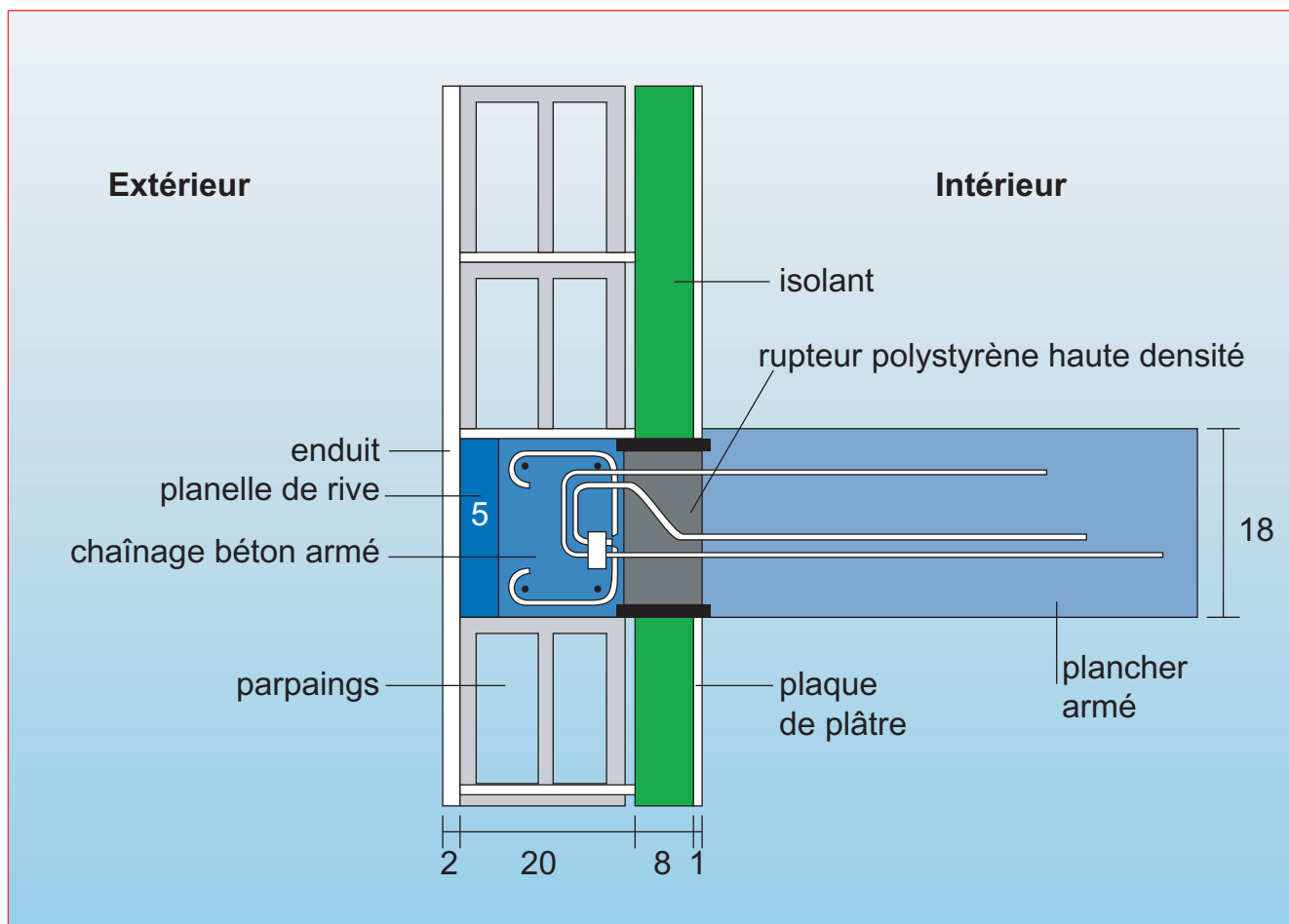
7 domaines d'exigence :

- L'isolation thermique
- Les apports de chaleur solaire
 - La ventilation
 - Le chauffage
- L'eau chaude sanitaire
 - L'éclairage
 - La climatisation

Parois	Coefficient U maximal (en W/m ² .K)
Murs en contact avec l'extérieur ou le sol	0,47
Planchers sous combles et rampants des combles aménagés	0,30
Planchers bas donnant sur l'extérieur ou sur un parking collectif, et toitures terrasses en béton ou en maçonnerie, à l'exclusion des toitures prévues pour la circulation des véhicules	0,36
Autres planchers hauts, à l'exclusion des toitures prévues pour la circulation des véhicules	0,47
Planchers bas donnant sur un vide sanitaire	0,43
Fenêtres et portes-fenêtres prises nues	2,90
Façades rideaux	2,90

Valeurs maximales du coefficient de transmission thermique U (W/m².K) pour les différents types de paroi d'un local chauffé. (Art. 31 de l'arrêté du 29 novembre 2000.)

1



2 Coupe verticale d'une liaison mur-plancher avec détail de mise en œuvre de rupteurs de ponts thermiques, associés à une isolation thermique par l'intérieur.

Le climat a toujours joué un rôle déterminant dans la création de la forme bâtie. L'architecture savante, depuis Vitruve, et l'architecture vernaculaire ont toujours cherché à s'intégrer au climat environnant et à en tirer parti (tours à vents, etc.). Si l'architecture vernaculaire témoigne d'une réflexion profonde sur l'habitat local, le climat n'est pas le seul moteur du mode de construction vernaculaire. Comme l'a montré A. Rapoport dans "Pour une anthropologie de la maison", en 1972, le climat constitue un facteur important, intervenant aux côtés d'autres facteurs : culturels, sociaux, économiques, etc.

L'image de l'architecture vernaculaire est façonnée autant par le climat (orientation, type de fenêtre, etc.) que par les matériaux disponibles, l'état de la technologie, l'organisation du travail et des rapports sociaux, etc. Certaines architectures vernaculaires restent remarquables aujourd'hui par l'originalité de l'adéquation entre les besoins en habitat et les paramètres locaux (climat, matériaux, etc.). Certaines typologies locales, comme les bastides dans le sud-ouest de la France, ont été développées pour des raisons militaires mais ont réussi à intégrer la dimension climatique. Permettant de circuler à l'abri des intempéries en hiver, le large passage voûté ceinturant la grand-place de Monpazier (Fig. 1) protège également des ardeurs du soleil en été.

L'habitat troglodytique, recouvrant l'ensemble des habitations humaines situées dans le sol ou utilisant des cavités naturelles ou artificielles est une architecture vernaculaire très particulière. La condition principale à ce type d'habitat réside dans la présence d'un sol de roche tendre et exempt d'humidité. Ces habitats se rencontrent surtout autour de la Méditerranée, mais aussi dans le Puy-de-Dôme, en Touraine, en Picardie, dans la région des Baux de Provence ou dans le Soissonnais. L'habitat enterré se caractérise par la disparition de la façade exposée à l'extérieur et par l'augmentation considérable de l'inertie thermique de l'enveloppe. La variation journalière des températures disparaît ; seul le cycle annuel pèse sur l'ambiance intérieure, tout en subissant l'amortissement et le déphasage consécutifs à la masse thermique des matériaux mis en œuvre, fonctionnant comme un stockage intersaisonnier.

A Matmata en Tunisie (Fig. 2), on rencontre des habitations construites autour d'un puits central d'environ dix mètres de profondeur. Les pièces de vie sont construites autour de ce patio, parfois sur plusieurs niveaux. L'accès se fait par un tunnel en pente. Dans un climat chaud et aride comme celui de la Tunisie, les avantages du patio souterrain sont multiples : inertie thermique du sol, réduction de l'exposition au soleil par un ombrage maximal, stratification de l'air avec réservoir d'air frais au fond du patio, réduction de l'exposition aux vents, et aux poussières, etc.

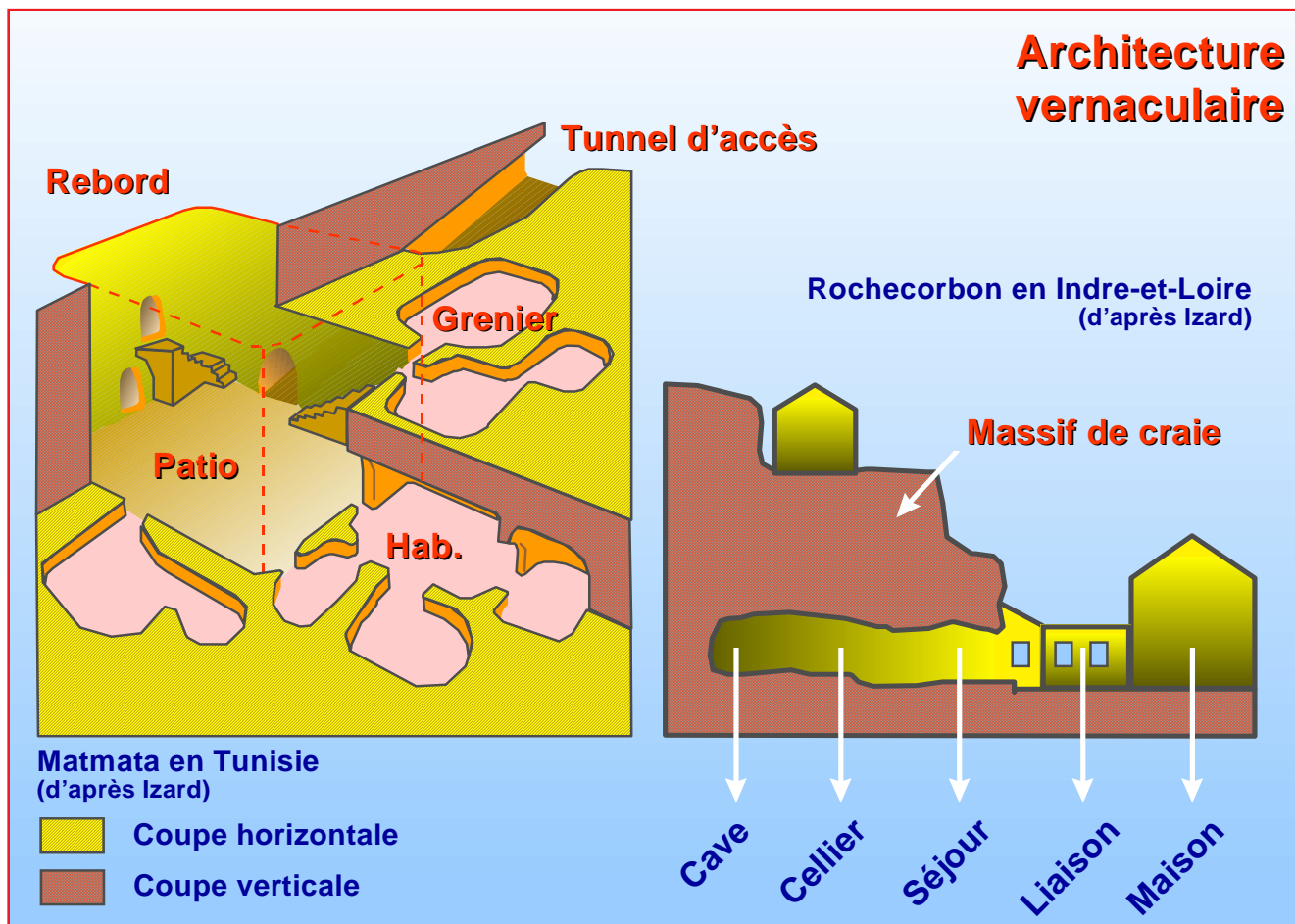
De nombreuses maisons traditionnelles en Indre-et-Loire, sont de type semi-troglodytique. Dans les falaises qui surplombent la rive nord de la Loire, à Rochecorbon (Fig. 2), des grottes creusées dans un sol semi-dur et bien sec font office d'annexes ou de séjours-cuisines. Un couloir vitré les relie généralement au reste de la maison. La stabilité thermique de ces pièces et l'absence d'humidité en font de très bonnes réserves à vin ou à légumes et, éventuellement, un lieu de retraite accueillant lors des grandes chaleurs.

Le climat influe de manière importante sur la forme bâtie. L'architecture vernaculaire témoigne d'une réflexion sur les conditions locales de construire et d'habiter.



Bastide de Monpazier, au sud du Périgord.

1



2 Architectures troglodytiques en Tunisie et en France.

Toute réalisation architecturale concrétise un microcosme en rapport plus ou moins étroit avec l'environnement auquel il appartient. Le but de la conception, de la rénovation et de la construction d'un bâtiment est de réaliser ce microcosme en concordance optimale avec son environnement et de donner ainsi au climat une juste place parmi les dimensions fondamentales de toute intervention de l'architecte sur l'environnement (Fig. 1). L'architecture ainsi définie inclut le climat et la dynamique qu'il implique : c'est l'architecture bioclimatique.

L'occupant est au centre de l'architecture bioclimatique (Fig. 2). Elle n'existe que dans l'objectif d'essayer de répondre à des exigences de confort. L'architecture bioclimatique se préoccupe donc des paramètres qui conditionnent le bien-être de l'habitant.

Le comportement des occupants commande la "bonne marche" d'une habitation bioclimatique. Il importe que les habitants prennent conscience de l'importance de leur rôle et apprennent à vivre en symbiose avec leur environnement, au rythme des jours et des saisons.

La notion d'environnement est un concept à double entrée : elle définit le climat mais, en retour, elle implique aussi l'action de l'homme sur son milieu. Vivre en symbiose avec son environnement, c'est à la fois s'y intégrer et le respecter.

Le climat est l'élément critique dans la conception d'une architecture bioclimatique : évolution de l'ensoleillement et des températures, régime des vents et des précipitations, tout contribue à déterminer un environnement physique auquel l'architecte cherche à répondre.

Nos climats n'offrant pas des conditions climatiques suffisantes pour assurer le confort thermique toute l'année, il est nécessaire de corriger les données climatiques par le chauffage ou le refroidissement des bâtiments. L'objectif à poursuivre est donc d'obtenir la meilleure adéquation entre le climat, le bâtiment et le comportement de l'occupant.

L'habitat bioclimatique tire parti du climat afin de rapprocher au maximum ses occupants des conditions de confort. Sous nos climats tempérés, les variations de l'ensoleillement, du vent et des températures demandent de mettre en œuvre diverses stratégies adaptées aux différentes saisons. En hiver, il importe de profiter des apports solaires et de se protéger du froid (stratégie du chaud) ; en été, il faut se préserver du soleil et, parfois, ouvrir sa maison aux vents (stratégie du froid).

L'habitat bioclimatique s'accorde enfin aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible de la lumière naturelle (stratégie de l'éclairage naturel).

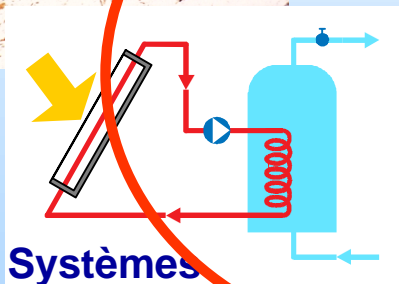
Parler d'architecture bioclimatique, au-delà des questions d'économie d'énergie et de protection de l'environnement, c'est avant tout se référer à l'homme-habitant et à son bien-être.

L'architecture bioclimatique rétablit l'architecture dans son rapport à l'homme ("l'occupant") et au climat (extérieur et intérieur : les "ambiances").

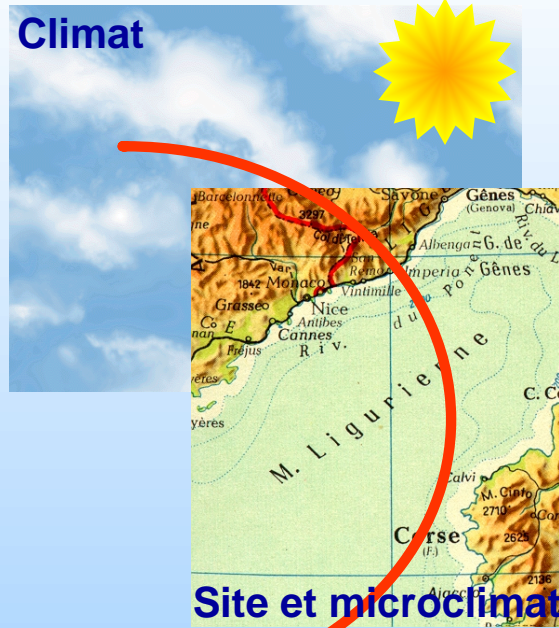


Le bâtiment répond au climat pour assurer le meilleur confort de l'occupant (arch. Y. Célaire).

1



Climat



Confort de l'occupant

2 L'architecture bioclimatique place l'occupant au centre de ses préoccupations.

La conception solaire passive n'a de sens que si l'enveloppe du bâtiment est performante (Fig. 1). La maison solaire passive doit donc être bien conçue du point de vue de la conservation de l'énergie, ce qui fait intervenir plusieurs paramètres :

- Le niveau d'isolation doit être garanti en tout point de l'enveloppe (valeurs $K < 0,25$ à $0,4 \text{ W/m}^2.K$) en évitant soigneusement les ponts thermiques (balcons, complexe chevron / isolation, volets, fondations, etc.).

- L'enveloppe doit également garantir une étanchéité suffisante à l'air pour éviter les infiltrations inopportunes par grand froid ou par grand vent. Il faut veiller au contrôle du renouvellement d'air par un système de ventilation.

- L'orientation du bâtiment doit être choisie de manière à maximiser les apports solaires. Le sud est à cet égard la meilleure orientation : le soleil y est disponible toute la journée, toute l'année, et la variation de la hauteur solaire fait en sorte que les apports sont plus importants en hiver qu'en été (loi du cosinus), à l'inverse des orientations est et ouest.

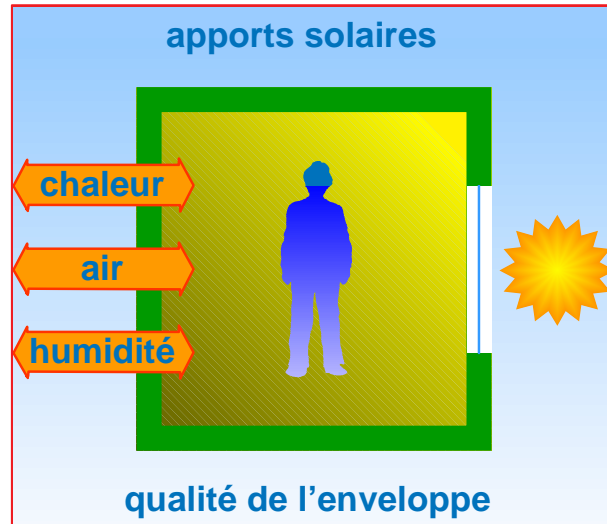
- Le travail de la coupe vise à laisser le soleil pénétrer le plus profondément au cœur du bâtiment. L'attention doit porter sur les hauteurs angulaires du soleil, le travail des niveaux, des cours intérieures, de l'éclairage zénithal, etc. Inversement, pour éviter la surchauffe, il convient de limiter la surface des baies vitrées orientées à l'ouest, d'utiliser un ombrage structurel de la façade (saillies, balcons) et de ventiler le bâtiment.

- Les habitations doivent être construites avec des matériaux lourds pour stocker la chaleur et atténuer les fluctuations de température (inertie thermique). Ces masses à haute capacité thermique seront disposées de manière à recevoir directement le rayonnement solaire.

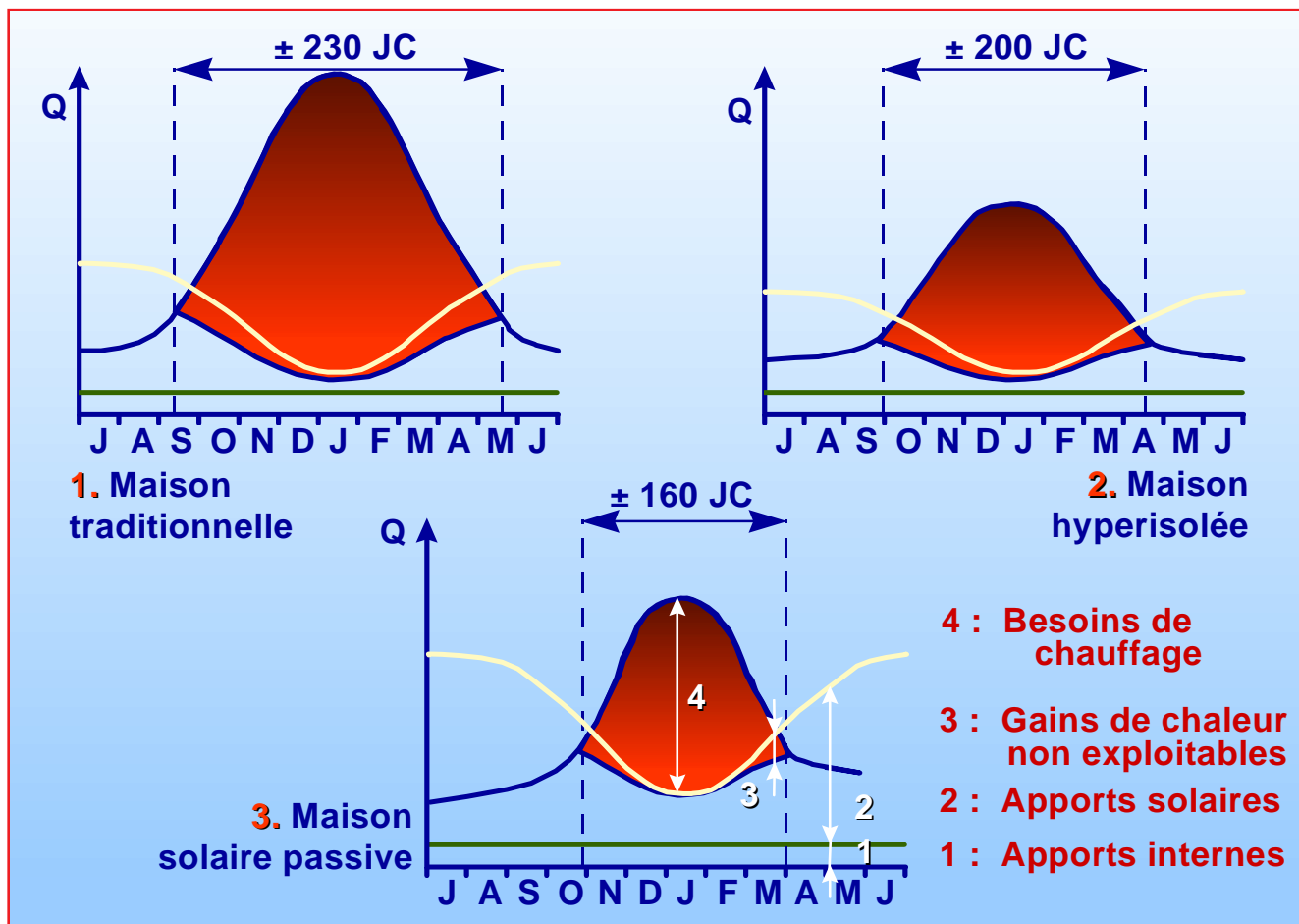
La figure 2 compare schématiquement les caractéristiques d'une maison solaire passive à une construction traditionnelle et à une maison hyper-isolée sur le plan de la consommation énergétique Q . En règle générale, les maisons solaires passives se distinguent par des gains solaires proportionnellement plus élevés, ce qui raccourcit la saison de chauffage. La ligne horizontale verte (1) représente le niveau des apports internes. La surface comprise entre la ligne (1) et la courbe jaune (2) représente les apports solaires. La surface rouge (4) représente les besoins en énergie de chauffage. On remarque une zone d'intersection (3) entre la courbe des apports solaires et la courbe de chauffage : il s'agit des apports solaires non utilisables (surchauffes, etc.).

Il doit être également remarqué que les pertes brutes d'une maison solaire passive sont supérieures à celle d'une maison hyper-isolée mais une grande partie de ces pertes est compensée par des gains solaires supérieurs. Le bilan énergétique est donc favorable aux maisons solaires passives et leur saison de chauffage est donc raccourcie.

L'architecture solaire passive se distingue par la performance de l'enveloppe et le soin mis à tirer parti des gains solaires directs pour raccourcir la saison de chauffage.



La qualité de l'enveloppe et l'utilisation des apports solaires directs caractérisent la conception solaire passive. **1**



2 Comparaison des profils annuels de consommation énergétique Q et du nombre de jours de chauffe (JC).

L'utilisation de l'énergie solaire est possible à différents niveaux d'intégration : solaire actif (technologie intégrée), solaire passif (conception architecturale intégrée) et solaire hybride au fonctionnement tantôt passif, tantôt actif.

Systemes actifs :

L'énergie solaire captée en façade ou en toiture par un panneau solaire chauffe un fluide caloporteur (air, eau) qui transfère cette énergie à un stock. La circulation du fluide caloporteur nécessite une dépense d'énergie (généralement électrique) qui représente une fraction de l'énergie captée. Le chauffe-eau solaire avec pompe de circulation est un système actif très répandu, de même que le plancher solaire direct et les capteurs solaires en général. La performance du système dépend avant tout de son réglage et de la qualité des composants.

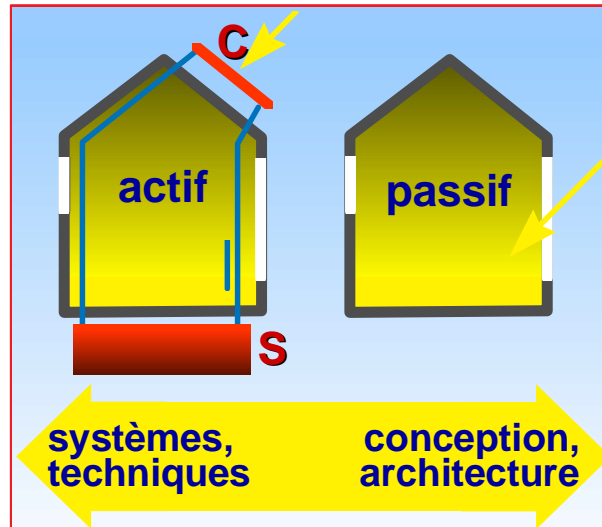
Systemes hybrides :

Ces systèmes ont un fonctionnement tantôt passif, tantôt actif, comme le collecteur-fenêtre (ou capteur-fenêtre) avec circuit d'air chaud ou le capteur à air. Le capteur-fenêtre fonctionne de deux manières : lorsque le rayonnement est faible, il se comporte comme une fenêtre ordinaire (gains directs) ; lorsque le rayonnement est plus intense ($> 300 \text{ W/m}^2$), un store vénitien est abaissé dans la coulisse entre la fenêtre intérieure et la fenêtre extérieure et un ventilateur pulse l'air en circuit fermé du collecteur vers le stock (et retour). Ces systèmes sont relativement complexes, encombrants et coûteux.

Systemes passifs :

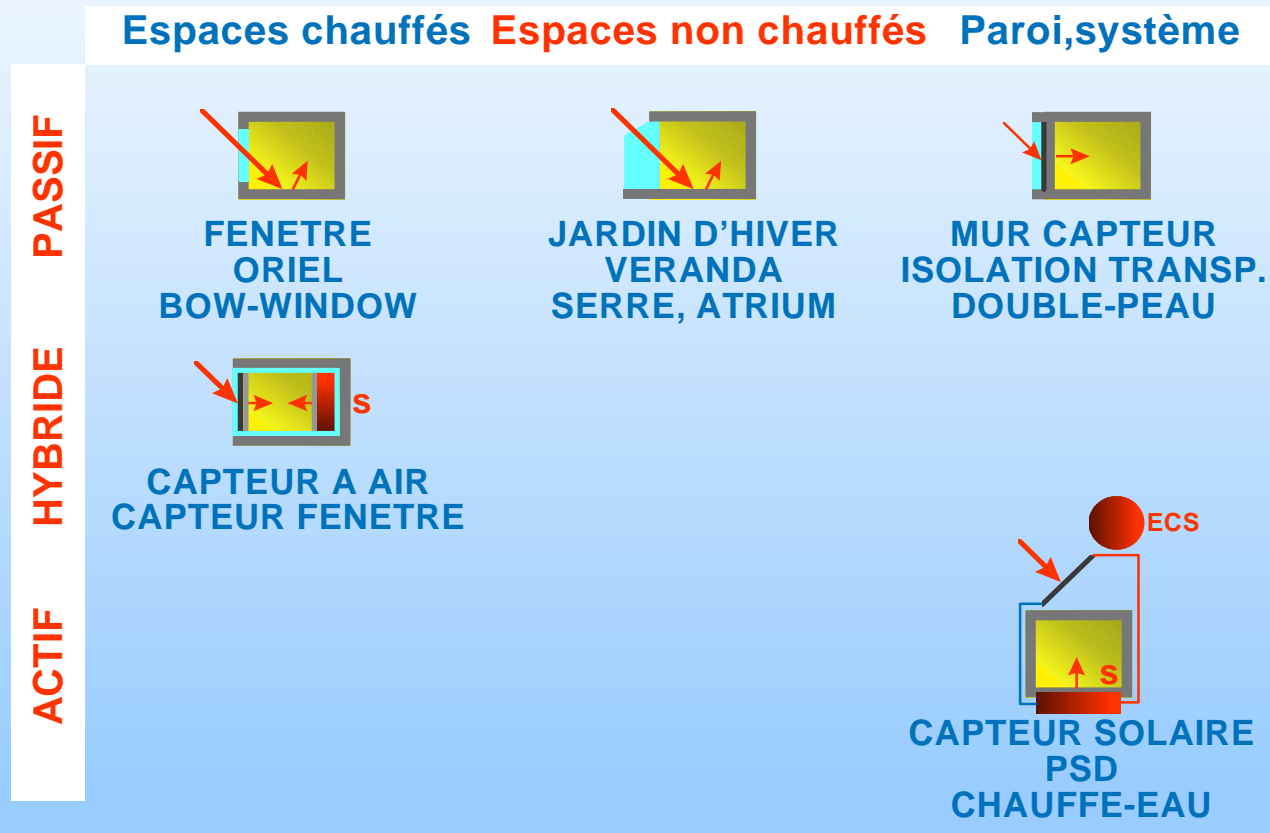
Les systèmes passifs les plus répandus sont la fenêtre, la véranda vitrée, la serre et, dans une certaine mesure, le chauffe-eau solaire à thermosiphon (voir fiche spéciale). L'utilisation passive de l'énergie solaire est en fait présente dans toute construction munie de fenêtres : elle consiste à laisser pénétrer le rayonnement solaire par les ouvertures transparentes, ce qui apporte à la fois lumière et chaleur. L'énergie solaire est captée et stockée dans les parties massives internes du bâtiment (dalles, plafonds, parois intérieures). La fenêtre est le capteur solaire le plus répandu et elle contribue, en l'état actuel, grâce à ses apports de chaleur, à réduire d'environ 10 % la consommation d'énergie de chauffage. La performance des systèmes passifs dépend avant tout de la qualité et de la précision de la conception architecturale. De plus, le surcoût est limité et l'encombrement spécifique nul.

L'utilisation de l'énergie solaire est possible à différents niveaux d'intégration : du solaire actif (technologie intégrée) au solaire passif (conception architecturale intégrée).



La conception solaire passive répond à une démarche d'architecture. **1**

Dispositifs d'architecture solaire



2 Récapitulatif des dispositifs d'architecture solaire.

L'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclairage, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, etc., mais aussi les qualités de l'habitat : communications, vues, rapports de voisinage, etc.

Les figures 1 et 2 proposent un petit bâtiment lauréat du concours Hélios, pour une architecture solaire passive, lancé en 1995 par la région wallonne. Protégé des vents du nord provenant du plateau voisin, le bâtiment est nettement fermé au nord-est et s'ouvre au site, au soleil et à la lumière du sud-ouest par une importante verrière qui agrandit l'espace originel de la grange.

La rénovation de cette grange a conduit à isoler le bâtiment par l'intérieur, ce qui a eu pour conséquence de réduire la masse thermique disponible. Certaines parois ont donc été réalisées en béton afin de garantir une capacité thermique suffisante pour réguler les apports solaires par la verrière.

Le plan très ouvert et les fenêtres en toiture garantissent une ventilation naturelle et compensent les risques de surchauffe dus à la grande surface vitrée et surtout aux plans de vitrages obliques. L'éclairage naturel est ainsi très abondant dans les espaces en communication directe avec la verrière : séjour au rez-de-chaussée, bureau et chambre à l'étage (Fig. 2). Des stores permettent d'atténuer un éventuel éblouissement.

Caractéristiques du bâtiment :

Surface de plancher chauffé : 157 m²

Compacité = 1,29

Niveau d'isolation : Kmoyen = 0,51

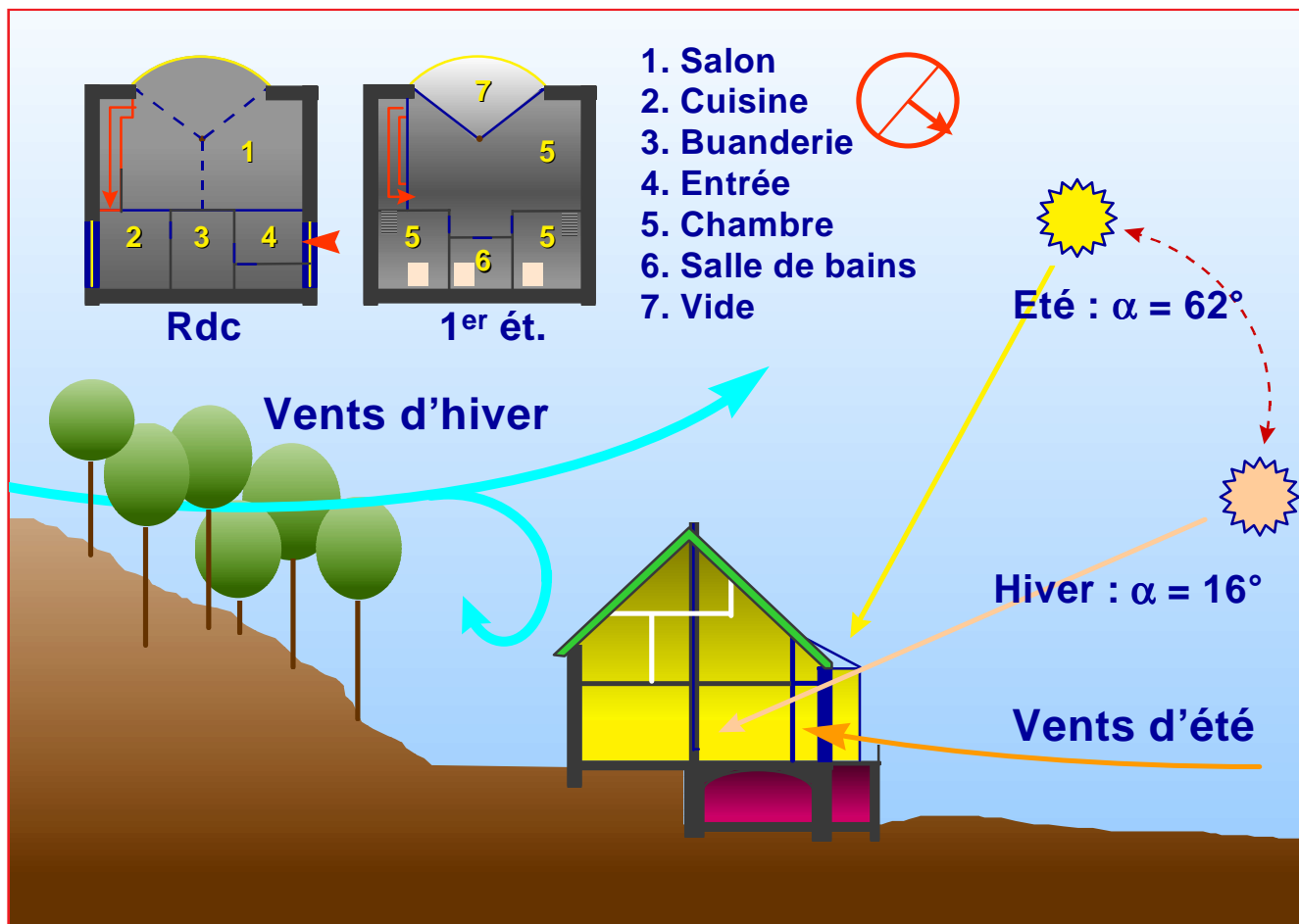
Besoins en énergie : Be = 304 MJ/m².an (soit 85 kWh/m².an)

Température de non-chauffage = 16,3 °C.

L'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclairage, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, etc.



Rénovation d'une grange en Ardenne : 1 protection des vents par la colline et ouverture au soleil (arch. M. De Graeve).



2 L'implantation tient compte du relief, des vents locaux, de l'ensoleillement, etc.

L'orientation d'un édifice répond à sa destination : les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour chauffer le bâtiment ou, au contraire, la nécessité de s'en protéger pour éviter la surchauffe, l'existence de vents pouvant refroidir le bâtiment en hiver ou le rafraîchir en été, sont autant de paramètres importants dans le choix de l'orientation.

Parfois agréable l'été, le vent est toujours source d'inconfort l'hiver. Par conséquent, protéger les façades des vents froids est toujours souhaitable, voire prioritaire, pour minimiser la consommation de chauffage.

Le soleil intervient pour dispenser lumière et chaleur. Une orientation adaptée aux contraintes du bâtiment permet ainsi de réduire les consommations de chauffage et d'éclairage. La figure 1 illustre ce dernier point en comparant les besoins annuels de chauffage d'une habitation selon l'orientation et la proportion de ses vitrages (rapport de la surface vitrée à la surface de la façade). On constate une sensible diminution des besoins de chauffage pour une orientation sud, alors qu'ils ne cessent d'augmenter pour une orientation nord. L'écartement progressif des courbes reflète le bilan thermique de la fenêtre : capteur de la chaleur au sud, elle devient surface déperditive au nord.

La figure 2 récapitule les règles de base qui régissent l'orientation des pièces. Une projection cylindrique de la course solaire à Paris permet de rapprocher orientation et hauteur solaire au fil des saisons. L'azimut est donné par les points cardinaux et la hauteur solaire est mesurée par les cercles concentriques. En regard des 8 orientations principales, un pourcentage indique la fraction du rayonnement solaire disponible par rapport au sud, considéré égale à 100 %.

Les pièces orientées au nord bénéficient toute l'année d'une lumière égale et du rayonnement solaire diffus. Pendant l'été, elle peuvent souffrir d'un rayonnement direct au petit matin et en soirée car le soleil est bas et ses rayons provoquent un éblouissement difficile à contrôler.

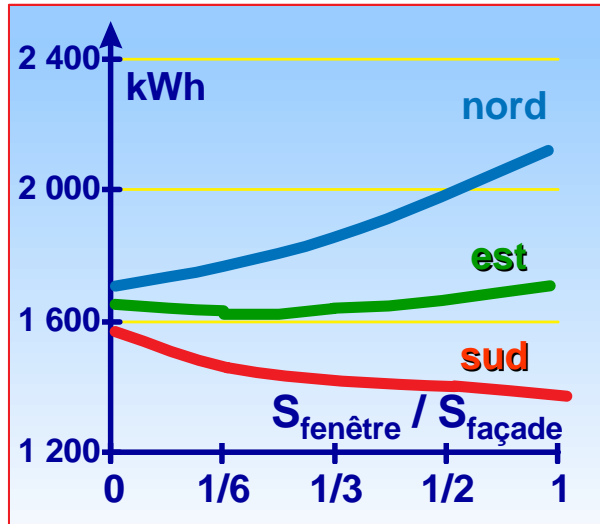
Les pièces orientées à l'est bénéficient du soleil le matin mais la lumière est difficile à maîtriser car les rayons sont bas sur l'horizon. L'exposition solaire y est faible en hiver mais, en été, elle est supérieure à l'orientation sud, ce qui est peu intéressant.

Les pièces orientées à l'ouest présentent des caractéristiques identiques : possibilité d'inconfort visuel par éblouissement et surexposition en été. De plus, en été, ces pièces étant exposées à un rayonnement solaire intense qui s'additionne aux températures déjà élevées en fin de journée, il devient difficile de contrôler les surchauffes.

Les pièces orientées au sud bénéficient d'une lumière plus facile à contrôler et d'un ensoleillement maximal en hiver et minimal en été. En effet, en hiver, le soleil bas ($\pm 17^\circ$) pénètre profondément dans la maison tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée ($\pm 60^\circ$) et la pénétration du soleil est donc moins profonde. Le sud est l'orientation qui permet le meilleur contrôle passif de l'ensoleillement. Les apports solaires sur une surface verticale (fenêtre) sont également nettement inférieurs au sud car ils sont diminués par un facteur égal au cosinus de l'angle d'incidence.

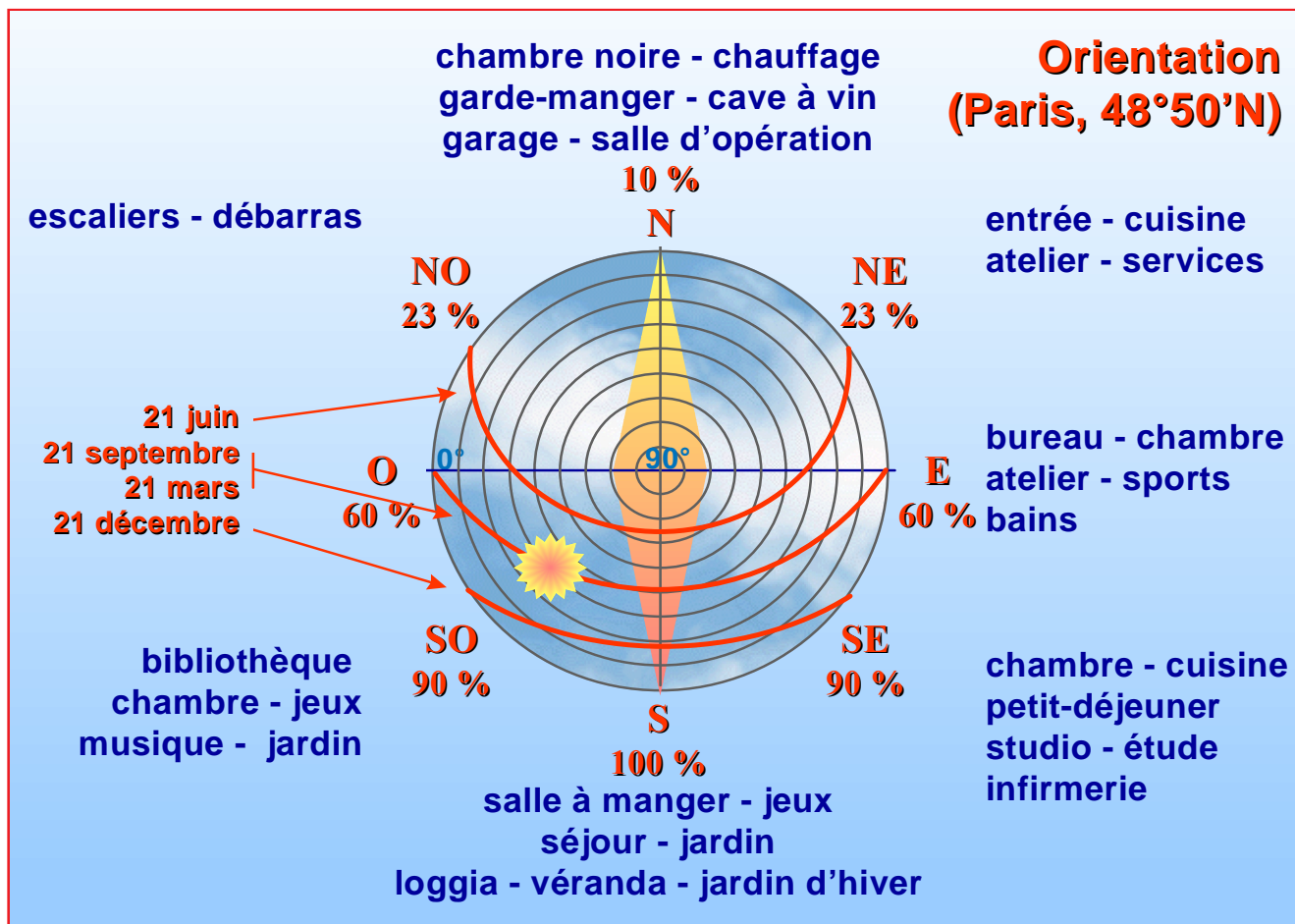
L'orientation de chaque pièce répond à son utilisation.

Le sud permet de tirer le meilleur parti de l'ensoleillement quand celui-ci est nécessaire à l'équilibre thermique du bâtiment.



Variation des besoins annuels de chauffage d'une habitation en fonction de l'orientation et de la proportion de surface vitrée.

1



2 L'orientation de l'édifice par rapport aux vents et au soleil.

Cloisonner des espaces en différentes zones permet de créer des ambiances thermiques différentes, mieux appropriées à leurs utilisations. Cela permet également de créer des espaces protecteurs ou espaces tampons au nord du bâtiment. Ainsi, l'organisation et la conception architecturale de l'intérieur de l'habitation permettent de répartir et de conserver au mieux la chaleur.

Le principe de cloisonnement, également appelé zonage, permet d'adapter le type d'ambiance thermique à l'utilisation propre de l'espace : une pièce peu utilisée ou une chambre sera moins chauffée (température de consigne de 18 °C) qu'un séjour ou une salle de bains (20 à 22 °C). Ce principe de cloisonnement peut se compléter par l'adjonction d'espaces tampons protecteurs tels que rangements et garage, adossés côté nord de l'habitation. Dans les bâtiments à toiture inclinée, le grenier peut aussi devenir un espace protecteur des conditions climatiques extérieures.

Afin qu'un espace tampon remplisse pleinement son rôle, au nord, il est nécessaire de placer l'isolant entre les espaces de vie et les zones tampons plutôt qu'au niveau de l'enveloppe du bâtiment : de cette manière, les espaces tampons sont exclus du volume chauffé.

Côté sud, une serre peut également servir de tampon en protégeant les parois vitrées. Contrairement aux espaces tampons nord dont le rôle est passif, la serre joue un rôle actif en permettant de profiter des apports solaires (Fig. 1).

Le zonage remet en question le rapport entre les occupants et les rythmes climatiques. Il réintroduit les nomadismes saisonniers car certains espaces comme les serres pourront être habitables en été mais pas en hiver.

Enfin, l'adjonction d'un sas à l'entrée principale du bâtiment peut compléter la gamme des espaces protecteurs. Un sas permet de réduire l'engouffrement d'air frais à chaque ouverture de la porte tout en jouant le rôle de tampon entre les espaces de vie et l'extérieur.

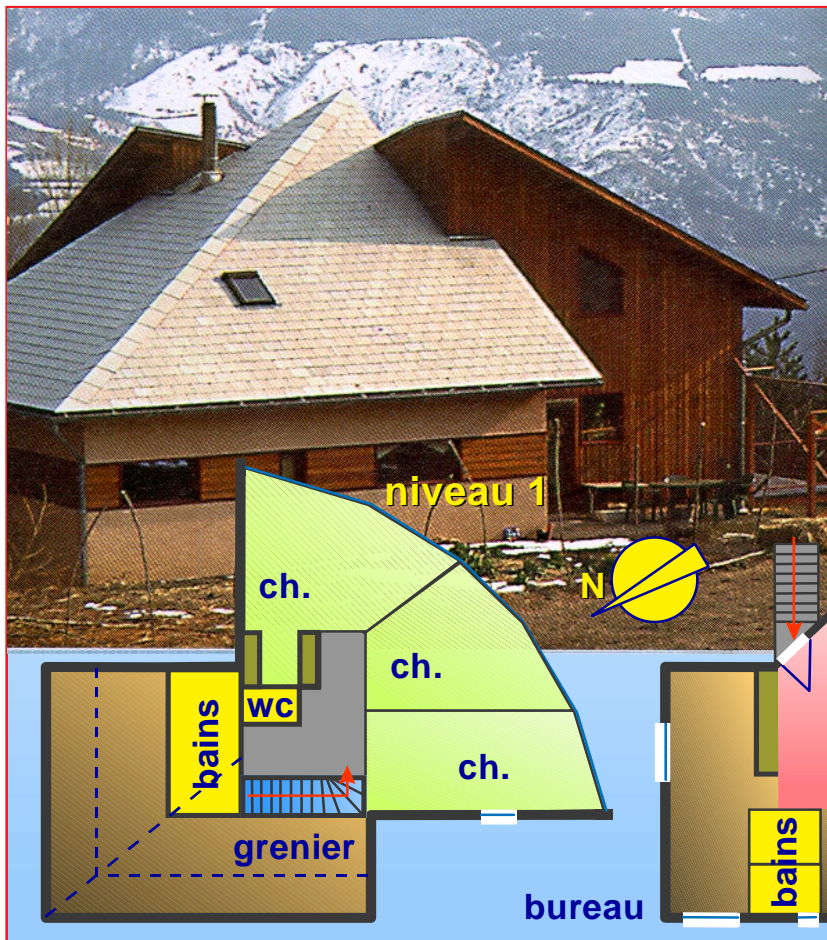
La figure 2 illustre le concept de zonage thermique et d'espaces tampons pour une habitation individuelle située dans un climat relativement rigoureux, dans les Hautes-Alpes.

Au rez-de-chaussée, les pièces de vie sont orientées au sud, alors que les pièces d'appoint (chambre d'amis et bureau) sont placées au nord. Entre ces deux zones, plusieurs espaces de service (WC, hall d'entrée et rangements) procurent un effet tampon supplémentaire. A l'étage, les chambres s'ouvrent largement au sud par leur grand côté, alors que le grenier fait office d'espace tampon protecteur au nord.

Cloisonner des espaces en différentes zones permet de créer des espaces protecteurs et des ambiances thermiques différentes, mieux appropriées à leurs utilisations propres.



1 Les serres sont placées en espace tampon entre l'ambiance extérieure et la paroi des logements, Dijon (arch. Dubosc - Landowski).



Zonage thermique

Maison Ismalun
Embrun (Hautes-Alpes)

2 Espaces tampons organisés par zonage, au nord (arch. R. Marlin).

La thermocirculation de l'air est un mode de distribution de la chaleur dû à l'échauffement de l'air par l'ensoleillement.

Lorsque sous l'effet du rayonnement solaire, une paroi intérieure s'échauffe, elle cède une partie de la chaleur accumulée à l'air ambiant par convection. A cet instant, l'air acquiert un mouvement ascendant créant un appel d'air plus frais. Contrairement au vent ayant pour effet de créer un flux d'air sensiblement horizontal, les mouvements d'air dus aux gradients de température ont une allure plutôt verticale. En effet, le gaz (ou le liquide), plus léger chaud que froid, aura naturellement tendance à monter. Une fois en haut, le gaz se refroidit et redevient plus lourd : il est alors remplacé par du gaz plus chaud, créant ainsi un mouvement de circulation en boucle.

Pour peu que l'agencement des espaces s'y prête (Fig 1), les masses d'air s'élèvent naturellement dans le bâtiment et une circulation d'air entre les zones exposées au rayonnement et les zones non exposées s'établit. Ce mouvement a pour nom : thermocirculation de l'air.

En période nuageuse ou nocturne, afin d'éviter une circulation inverse ayant pour effet un refroidissement de l'habitat, le mouvement d'air doit être empêché. Une isolation amovible permet d'éviter cet éventuel désagrément.

La figure 2 rappelle que l'utilisation du phénomène de la thermocirculation de l'air nécessite une organisation spatiale ouverte. Les différences de densité à l'origine du phénomène de la thermocirculation de l'air étant très faibles, il faut disposer de grandes surfaces de communication entre les pièces froides et les pièces chaudes. La grande différence de niveau entre des pièces chaudes au rez-de-chaussée et des pièces plus froides à l'étage encourage la thermocirculation.

L'habitant à la recherche de diverses ambiances et d'une utilisation plus souple des espaces, devient animateur énergétique. En fonction des variations atmosphériques et du rythme de vie, il agit sur les différents éléments à sa disposition. C'est à son initiative que la thermocirculation est engendrée afin d'éviter les surchauffes et de veiller à une meilleure uniformité des températures intérieures. Inversement, l'habitant peut inconsciemment contrarier les mouvements d'air : porte intérieure malencontreusement fermée, porte de véranda laissée ouverte par temps froid et peu ensoleillé, etc. Ces oublis auront tôt fait de produire un mouvement inverse ayant pour effet de refroidir la maison.

L'habitant est donc responsable de la bonne gestion des mouvements d'air à l'intérieur de son logement.

La thermocirculation de l'air est un mode de distribution de la chaleur dû à l'échauffement de l'air par l'ensoleillement.

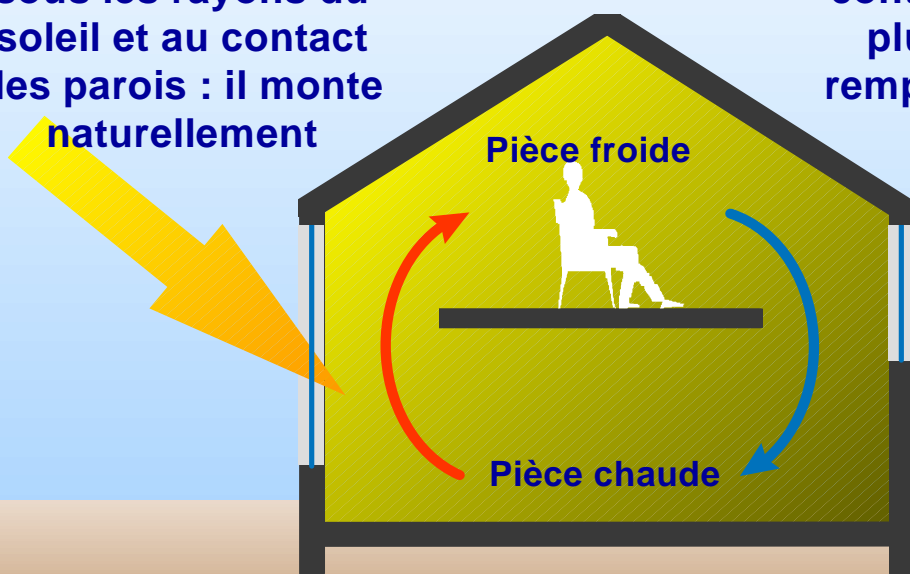


Des espaces ouverts permettent la circulation des masses d'air. 1

Thermocirculation de l'air

L'air se réchauffe sous les rayons du soleil et au contact des parois : il monte naturellement

L'air se refroidit au contact des parois : plus lourd, il est remplacé par de l'air plus chaud.



Echauffement

Appel d'air frais

2 Principe de la distribution de la chaleur par thermocirculation.

Les ouvertures, et les fenêtres qui s'y nichent, jouent un rôle important dans les relations du bâtiment et de l'occupant avec son environnement. En effet, les échanges de chaleur, les déperditions thermiques et les apports de chaleur ainsi que les apports solaires proviennent principalement des ouvertures. Celles-ci établissent le contact entre l'extérieur et l'intérieur et permettent ainsi d'améliorer le bien-être de l'occupant. Les ouvertures, et particulièrement les fenêtres, sont donc un élément majeur de tout édifice et ont toujours bénéficié de la plus grande attention des architectes (Fig.1).

Au plan thermique, même les fenêtres les mieux isolées présentent encore aujourd'hui un coefficient de déperdition thermique K nettement supérieur à celui des parois isolées. Elles constituent donc une des sources principales de déperditions du bâtiment. La déperdition peut être améliorée si l'on recourt à des volets isolants ou à des rideaux.

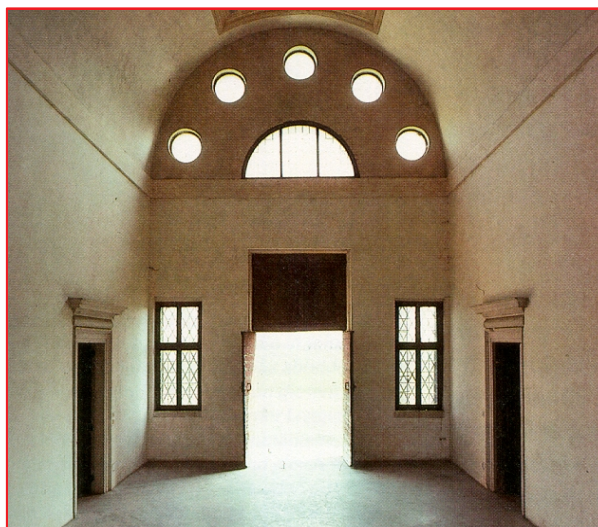
En hiver, la pénétration du soleil par les ouvertures assure une économie d'énergie. En été, elle peut avoir l'effet opposé s'il devient nécessaire de refroidir l'habitation. L'orientation, l'inclinaison et la distribution des ouvertures sont des éléments décisifs dans la conception du projet. Sur le plan énergétique, l'orientation sud est la plus favorable en hiver (rayonnement intense) et en été (rayonnement limité, limitation des surchaufes). L'inclinaison la plus efficace se situe entre 45° et la verticale (90°).

La figure 2 détaille une maison de 150 m² construite à Wolfhausen en Allemagne qui permet d'examiner le travail en coupe des fenêtres par rapport à l'ensoleillement d'hiver et d'été. Tout concourt à laisser rentrer les rayons solaires en hiver et à s'en protéger en été : la hauteur des fenêtres, la profondeur des pièces, la largeur des balcons ou la longueur des avancées de toiture. La légère surélévation de la chambre, au sud, permet au soleil de pénétrer plus profondément dans le salon, alors qu'une fenêtre haute permet à la deuxième chambre de bénéficier d'une double exposition. Une cour anglaise illumine les caves naturellement. Le balcon sud joue également un rôle de pare-soleil en été. Un système de volets mobiles isolés permet de contrôler tant les déperditions thermiques en hiver que le risque de surchauffe en été.

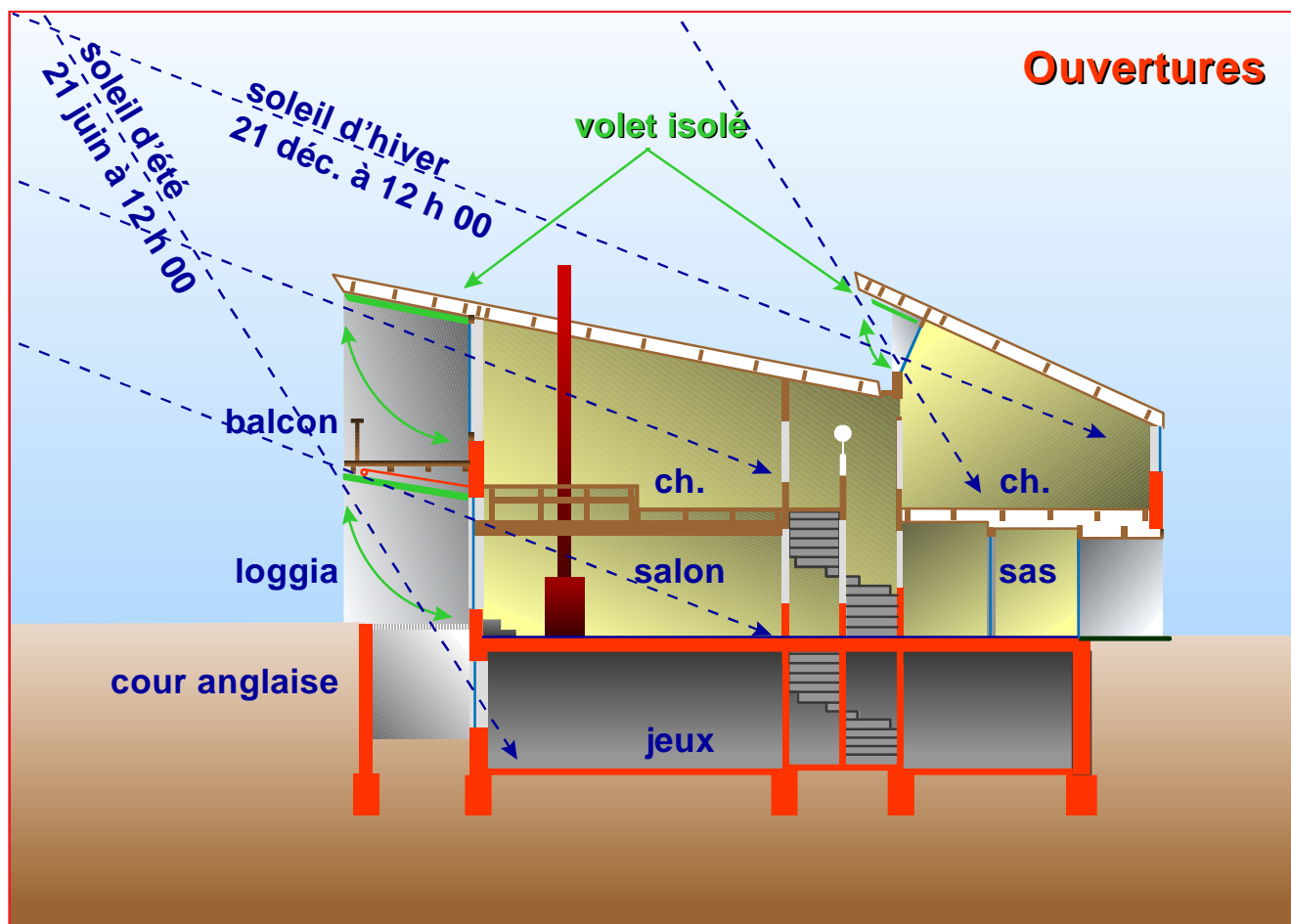
Il est important de noter que si les fenêtres verticales orientées au sud peuvent être efficacement protégées de l'ensoleillement, en été, par des protections fixes comme des auvents ou des débords de toiture, ceci n'est pas le cas des autres orientations ou inclinaisons.

Par ailleurs, il faut tenir compte que l'utilisation de protections fixes (pare-soleil, vitrage réfléchissant, etc.) implique une certaine réduction des apports de lumière naturelle et des gains solaires en hiver.

Les ouvertures sont les moyens de communication de l'édifice : leurs positions, leurs dimensions et leurs proportions règlent l'entrée de l'air, de la lumière et du soleil.



La fenêtre est le regard du bâtiment sur son environnement, Palladio, villa Poiana, Italie. **1**



2 Le travail en coupe des ouvertures permet de déterminer l'importance et le calendrier des apports de lumière naturelle et des gains solaires (arch. H. Bolliger).

La fenêtre est un élément indispensable au bâtiment :

- projet de vue : vers quelle partie du paysage s'ouvrir ou se protéger ?
- projet thermique : orientation et inclinaison à privilégier ? Quel facteur solaire et quel coefficient K choisir ?
- projet de lumière naturelle : lumière directe, diffuse et réfléchie ? Quelle transmission lumineuse choisir ?
- projet de ventilation : quelle est la place de la fenêtre dans le circuit de ventilation de l'édifice ? Quelles protections solaires choisir ?

La figure 1 illustre une fenêtre qui différencie ses composants sur les plans thermiques et lumineux : en imposte, un vitrage fixe est protégé par un pare-soleil extérieur mobile ; au centre, les ouvrants sont constitués d'un double vitrage clair ; les allèges, quant à elles, sont redoublées par l'extérieur d'un isolant transparent, ce qui améliore la performance thermique du bas du vitrage mais permet également de mieux diffuser une partie de la lumière incidente.

La figure 2 synthétise les critères de qualité qui permettent de déterminer le choix des composants d'une fenêtre et identifie les facteurs réduisant les gains solaires. Enfin, des indices d'ouverture (rapport surface fenêtre / surface plancher) sont donnés, selon l'orientation, pour des bâtiments résidentiels construits sous nos climats.

Le rayonnement solaire traverse les surfaces vitrées pour atteindre directement les pièces d'habitation ou de travail. Il est alors accumulé sous forme de chaleur dans les parties massives de la construction. Des protections solaires extérieures permettent d'éviter l'excès de rayonnement et des stores intérieurs préviennent l'éblouissement en réfléchissant la lumière vers le plafond. Le rendement thermique est bon pour les vitrages présentant certaines qualités liées au coefficient de déperditions thermiques surfaciques K, au facteur solaire F ou à la transmission lumineuse TL, et si leur orientation est favorable (entre sud-est et sud-ouest). Les autres orientations sont possibles mais leur bilan thermique est moins favorable. Par contre, la capacité de stockage des fenêtres est faible (1 à 2 jours sans soleil) et les déperditions thermiques sont importantes la nuit, d'où l'intérêt d'une protection nocturne et par mauvais temps.

La fenêtre réunit de nombreux composants : vitrages, châssis, protections extérieures, rideaux, etc. Ces composants peuvent être considérés comme des obstacles car ils diminuent sensiblement les gains solaires sans avoir d'effet appréciable sur les déperditions thermiques. On sous-estime trop souvent leur encombrement, tant dans le calcul des gains solaires que, dans les calculs en lumière naturelle (facteur de lumière du jour : FLJ). On estime que le rendement réel de captage de l'énergie solaire passive (thermique et lumineuse) est d'environ 33 %.

Par ailleurs, il faut éviter de trop réduire la surface des fenêtres au nord (problème de surconsommation en éclairage artificiel) et il ne faut pas surdimensionner les fenêtres orientées à l'ouest (risque de surchauffe).

La fenêtre est l'élément de captage le plus simple et le plus répandu : elle apporte à la fois chaleur et lumière et offre la possibilité d'accumuler directement la chaleur.



La fenêtre propose un regard différent pour l'imposte, le dormant et l'allège. **1**

Critères de qualité :

$K_{\text{vitrage}} < 3 \text{ W/m}^2.\text{K}$

$K_{\text{châssis}} < 2 \text{ W/m}^2.\text{K}$

FS

TL

protections solaires

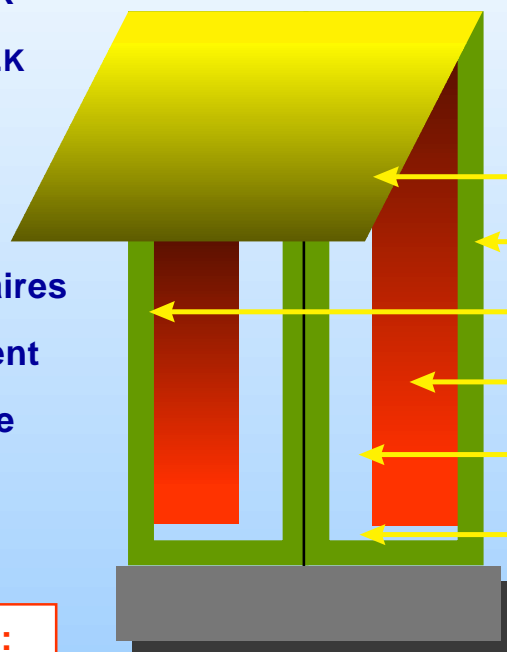
étanchéité au vent

aération intégrée

affaiblissement acoustique

$S_{\text{fenêtre}} / S_{\text{plancher}} :$

sud : 20-35 %
est-ouest : 15-25 %
nord : 10-15 %



Réduction des gains solaires :

- stores : 0 à 100 %
- menuiseries : 20 à 40 %
- ombrage : 10 à 20 %
- rideaux : 0 à 30 %
- réflexion absorption : 10 à 60 %
- propreté : 0 à 50 %

Gains solaires efficaces entre 0 et 50 % de l'ensoleillement disponible

2 Choix des composants et identification des facteurs intervenant dans la thermique de la fenêtre.

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée. Les protections solaires ont pour but de :

- Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Si l'on identifie un problème de surchauffe, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre.

- Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres. Cette propriété sera principalement recherchée durant les nuits d'hiver. Certaines protections intérieures peuvent réduire les déperditions thermiques des fenêtres de 25 % à 40 % .

- Contrôler l'éblouissement. Un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible. Ce phénomène est aussi important pour des fenêtres orientées au sud durant la saison chaude que lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin, pour les fenêtres orientées à l'est, le soir, pour les fenêtres orientées à l'ouest, ou encore au sud en hiver. De même, dans les locaux orientés au nord, la vision directe d'un ciel trop lumineux peut devenir gênante et nécessiter une protection. La luminosité peut être contrôlée par un système de protection installé indifféremment à l'extérieur ou à l'intérieur.

Les protections solaires peuvent être intégrées à l'architecture : structurales (porche, véranda, brise-soleil) ou appliquées (stores, persiennes, volets). Elles peuvent également être fixes ou mobiles (louvres), intérieures ou extérieures, verticales (principalement pour l'est et l'ouest) ou horizontales.

Les protections solaires peuvent également être liées à l'environnement. La végétation à feuilles caduques procure un ombrage naturel saisonnier. On recherchera des essences avec peu de branchages, pour avoir un ombrage minimum en hiver, mais avec un feuillage dense pour la raison inverse, en été. En ville, les bâtiments voisins constituent un masque important au rayonnement solaire. Le relief peut aussi devenir un élément essentiel de l'accessibilité du rayonnement solaire sur un bâtiment. En effet, si un bâtiment se trouve sur un terrain en pente, exposé au nord, celui-ci risque de ne jamais recevoir de rayonnement solaire en hiver.

La figure 2 montre quatre exemples de protections solaires :

1. Protection solaire par la végétation en France (arch. F. Nicolas).
2. Volets suspendus permettant de moduler l'ensoleillement en Suisse (arch. H. Bolliger).
3. Avant-toit protégeant des rayonnements du soleil, Suisse (arch. R. Wahli Ruefli).
4. Volets coulissant permettant de tamiser la lumière, France (arch. Bermond - Pochon).

Les protections solaires sont les compléments indispensables des fenêtres dès qu'il faut limiter les surchauffes et l'éblouissement en période d'ensoleillement.



1 Les multiples protections de la fenêtre contre l'excès de soleil (Salamanque, Espagne).



2 Exemples de quatre types de protections solaires.

Les serres et vérandas offrent un espace tampon qui favorise le captage du rayonnement solaire. Ce rayonnement est transformé en chaleur par effet de serre et se retrouve piégé dans l'espace tampon.

Les serres et les vérandas vitrées fonctionnent comme des espaces servant l'habitation. Il faut donc distinguer la surface vitrée (captage), la capacité de stockage (généralement le sol) et l'interface entre la serre et l'intérieur. L'habitation peut puiser de la chaleur directement par les surfaces vitrées de l'interface, par conduction au droit des surfaces opaques et par convection naturelle (ou éventuellement mécanique) de l'air réchauffé dans la serre.

La figure 2 illustre le fonctionnement de ces espaces en hiver comme en été. En hiver, le rayonnement solaire est le bienvenu pour réchauffer l'air de la serre et préchauffer l'air frais. Celle-ci peut offrir un lieu de séjour occasionnel (grande variation des températures) et constitue un espace tampon qui réduit les déperditions thermiques vers l'extérieur. En été, des protections solaires extérieures et une ventilation continue permettent de limiter la surchauffe.

La véranda est un élément architectural très riche : elle assure une relation privilégiée entre intérieur et extérieur (Fig. 1). Les serres et les vérandas ne peuvent être considérées comme des espaces pleinement habitables. Elles le seraient plutôt comme des réserves d'espace ou des extensions. L'espace tampon qu'elles constituent atténue les variations de températures du climat intérieur. Malheureusement, dans le cas de constructions bien isolées, leur contribution aux économies d'énergie est moindre : l'effet tampon étant moins sensible que l'effet dû à l'isolation. Elles ne sont habitables qu'à certaines périodes de l'année et leur bilan thermique dépend fort du comportement de l'occupant (si l'interface véranda / habitation est toujours ouverte : la note de chauffage augmente). Enfin, le coût de construction d'une serre est parfois plus élevé que les économies de chauffage qu'elle procure.

L'orientation préférentielle de la serre doit être le sud ($\pm 30^\circ$). Sa volumétrie idéale est celle d'un corps mince et élevé : profondeur inférieure à 2,50 mètres et hauteur sur 2 niveaux. Il existe actuellement une variété de systèmes constructifs : profils en aluminium avec coupure thermique, bois, PVC, etc. Le vitrage doit impérativement être double (sauf pour les vérandas dont la surface est inférieure à 8 m²), alors qu'un simple vitrage avec protection infrarouge suffira pour les parties vitrées de l'interface. Les protections solaires seront de préférence mobiles et extérieures et la conception devra permettre d'assurer une ventilation estivale (lucarnes ou ouvrants en partie haute).

En aucun cas, il n'est justifié d'installer le chauffage dans une véranda : elle ne jouerait plus son rôle d'espace tampon et gonflerait substantiellement les dépenses de chauffage. Pour les mêmes raisons, il ne faut pas supprimer l'interface, vitrée ou opaque, entre le volume chauffé de l'habitation et la véranda.

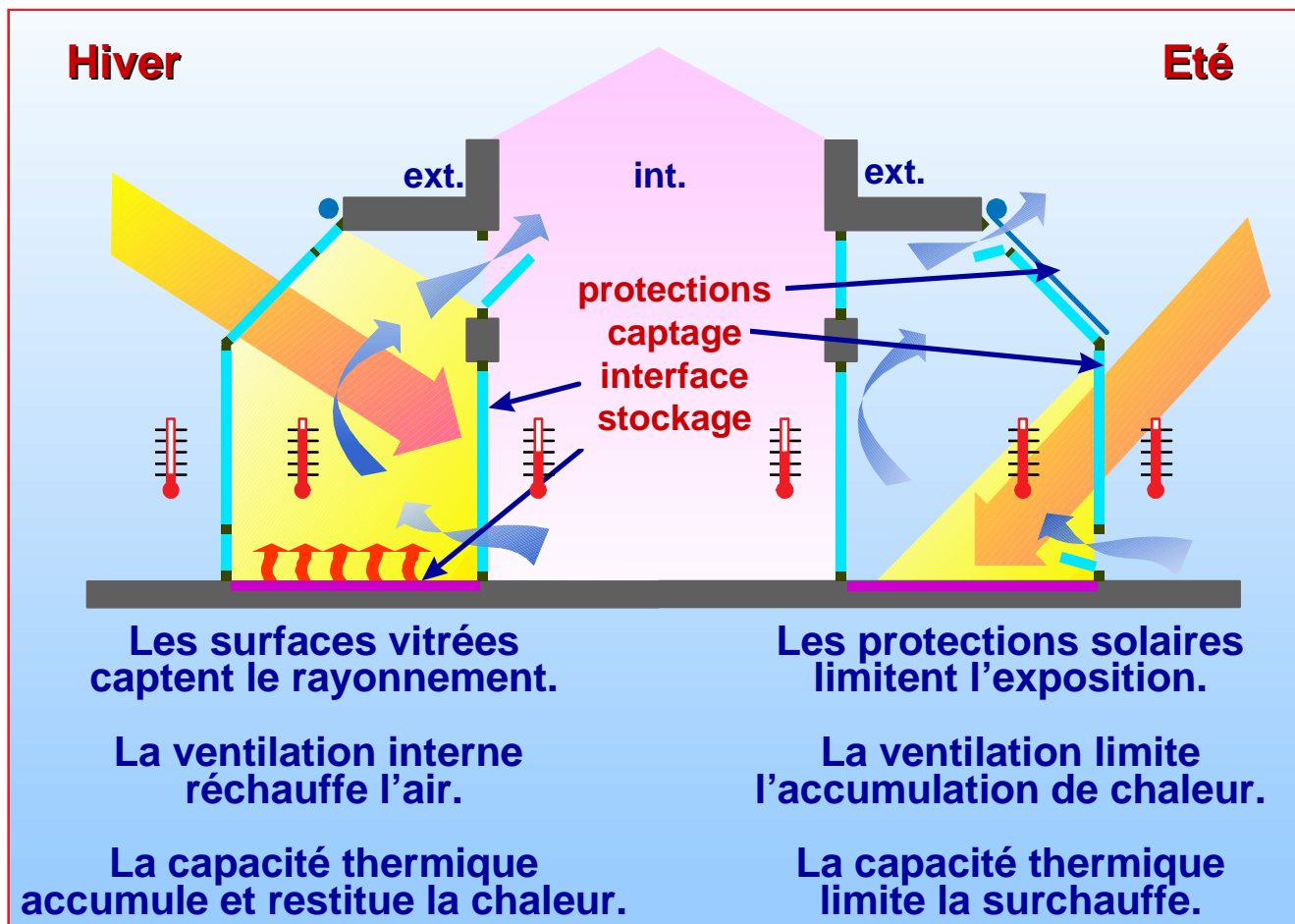
Les serres et vérandas offrent un espace tampon qui favorise le captage du rayonnement solaire.

Ce rayonnement est transformé en chaleur par effet de serre.



La serre offre un espace tampon privilégiant la relation entre l'intérieur et l'extérieur (arch. E. Moureau).

1



2 La serre est un milieu fragile dont il faut maîtriser tous les paramètres : fonctionnement d'hiver et d'été.

Une façade double peau est constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive, composée de parois vitrées et de parois opaques capables d'accumuler la chaleur. La façade double peau applique les mêmes principes que ceux des serres, mais elle ne propose pas d'espace habitable. Elle est intéressante pour des orientations proches du sud $\pm 30^\circ$; mais l'orientation ouest est à éviter pour cause de surchauffe.

Le rayonnement qui traverse les deux parois vitrées procure des gains solaires directs, qui seront éventuellement accumulés dans les sols et les parois intérieurs. Le rayonnement qui frappe les parties opaques de la double peau permet aux apports solaires d'être différés de quelques heures. Quant à l'espace intercalaire entre les deux peaux, il offre un effet tampon supplémentaire puisqu'il est échauffé par les déperditions vers l'extérieur de la paroi opaque : il réduit ainsi les pertes thermiques de l'enveloppe.

Le renouvellement de l'air doit être assuré car les doubles peaux sont trop étanches pour qu'un renouvellement d'air par les défauts d'étanchéité du bâtiment suffise. Par ailleurs, les ouvrants intérieurs et extérieurs devront être conçus de manière à pouvoir être ouverts simultanément.

La figure 1 montre un détail d'un bâtiment de bureaux. La double peau est conçue pour réduire les gains solaires et se protéger du bruit de la circulation. Elle est également munie d'une protection solaire indispensable pour limiter les surchauffes en été (store extérieur). Sur la photo, on peut distinguer les protections solaires (fixes et mobiles) ainsi que la ventilation.

Un vitrage simple convient pour la peau extérieure mais le vitrage de la peau intérieure doit être beaucoup plus performant (double vitrage à basse émissivité). Par ailleurs, un vitrage simple sélectif ou un vitrage isolant est placé devant les parois opaques.

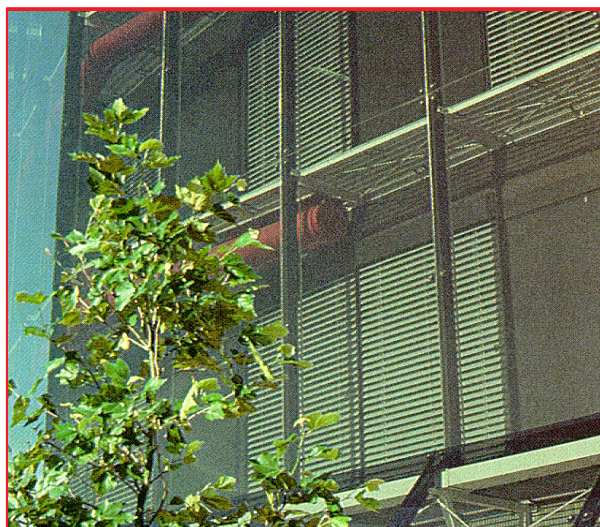
Les menuiseries, représentant près de 25 % de la surface totale de la façade, devront offrir un coefficient de déperdition thermique surfacique K inférieur à $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Les parois opaques doivent être massives (béton, plots de ciment, réservoirs à eau) et de couleur sombre sur leur face extérieure.

Les gains énergétiques des systèmes à double peau orientés plein sud sont généralement supérieurs aux pertes thermiques, sauf au plus fort de l'hiver pour un climat continental. Le confort est assuré en hiver et en mi-saison pour autant que les parois opaques présentent une capacité thermique suffisante (environ $111 \text{ Wh/m}^2 \cdot \text{K}$ soit 15 cm de béton). En été, le confort dépend avant tout du comportement de l'occupant car il importe de ventiler l'espace compris entre les deux peaux.

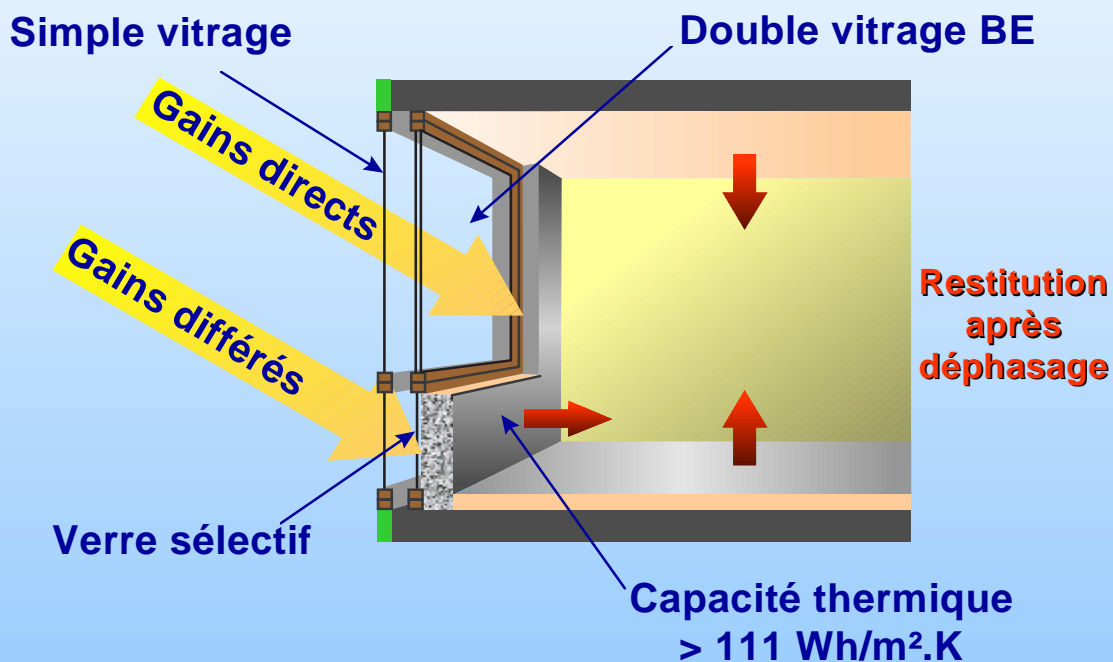
Le coût global d'une façade double peau est supérieur à celui d'une façade isolée conventionnelle, et il faut également prendre en considération l'aspect nettoyage des surfaces vitrées, qui peut s'avérer délicat dans le cas des doubles peaux.

Une façade double peau est constituée d'une paroi extérieure entièrement vitrée et d'une paroi intérieure plus massive. Cette dernière est composée de parois vitrées et de parois opaques capables d'accumuler la chaleur.



Double peau, Farnborough, Angleterre. 1

Façade double peau



2 Éléments d'une façade double peau.

Les murs capteurs captent l'énergie solaire, l'accumulent dans leur masse, l'amortissent et la restituent sous forme de chaleur à l'ambiance intérieure après un déphasage de plusieurs heures.

Le mur capteur est également appelé mur Trombe d'après les premiers travaux réalisés par le professeur Félix Trombe, en 1956, au CNRS.

Les murs capteurs sont constitués d'une masse thermique importante, permettant l'accumulation de la chaleur, couplée à un vitrage exposé au soleil et permettant de diminuer les pertes par convection. L'énergie solaire, transmise par le vitrage et absorbée par le mur, chauffe la surface externe du mur capteur ; puis la chaleur migre vers l'intérieur par conduction dans la masse du mur. La chaleur ne parvient à la surface interne qu'après un certain temps de déphasage et avec un certain amortissement. Ce déphasage dépend de l'épaisseur du mur et de la nature des matériaux. Un déphasage d'environ 6 à 8 heures permet de bénéficier de l'échauffement maximum, en face intérieure, au début de la nuit (Fig. 2).

La performance des murs capteurs est liée à la latitude du lieu, au site, à l'orientation et à l'inclinaison du mur : la meilleure orientation est toujours le sud ; la meilleure inclinaison tend vers la verticale plus la latitude augmente ; le site doit être exempt d'effet de masquage significatif. Le rendement des murs capteurs dépendra également de la nature des vitrages et des absorbeurs utilisés (facteur d'absorption voisin de 1).

Les murs capteurs étant par nature très sensibles aux phénomènes radiatifs, leurs déperditions thermiques nocturnes par rayonnement vers la voûte céleste sont importantes. Il est utile de prévoir une protection isolante pour améliorer le bilan énergétique du mur. En été et à la mi-saison, ces protections doivent pouvoir limiter le risque de surchauffe.

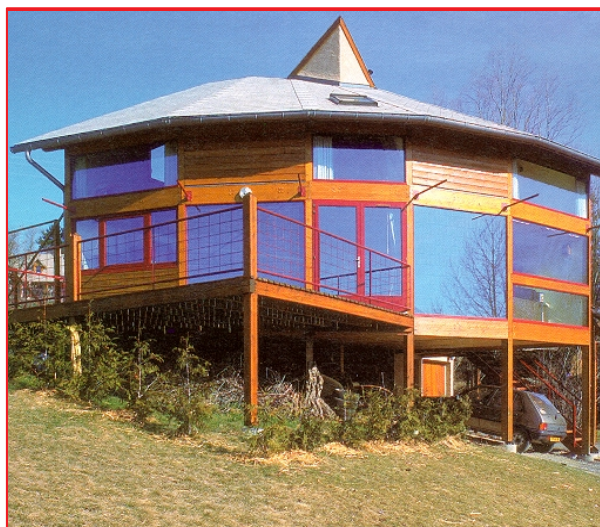
Par ses effets d'amortissement, le mur capteur doit garantir un bon confort thermique. Deux températures sont tout de même à vérifier :

- surface interne en fin de journée : maximum 24 à 25 °C,
- surface interne en début de matinée : minimum 15 °C.

La figure 2 indique le schéma de principe du mur capteur ainsi qu'un exemple de températures représentatives d'une journée par ciel clair, le 15 mars, à Bruxelles. La température ambiante intérieure est de 20 °C ; le mur est en maçonnerie ; le temps est donné en temps universel (t.u.). Dans la pratique, les valeurs maximales et minimales de la température de surface du mur sont plus rapprochées : entre 18 et 22 °C.

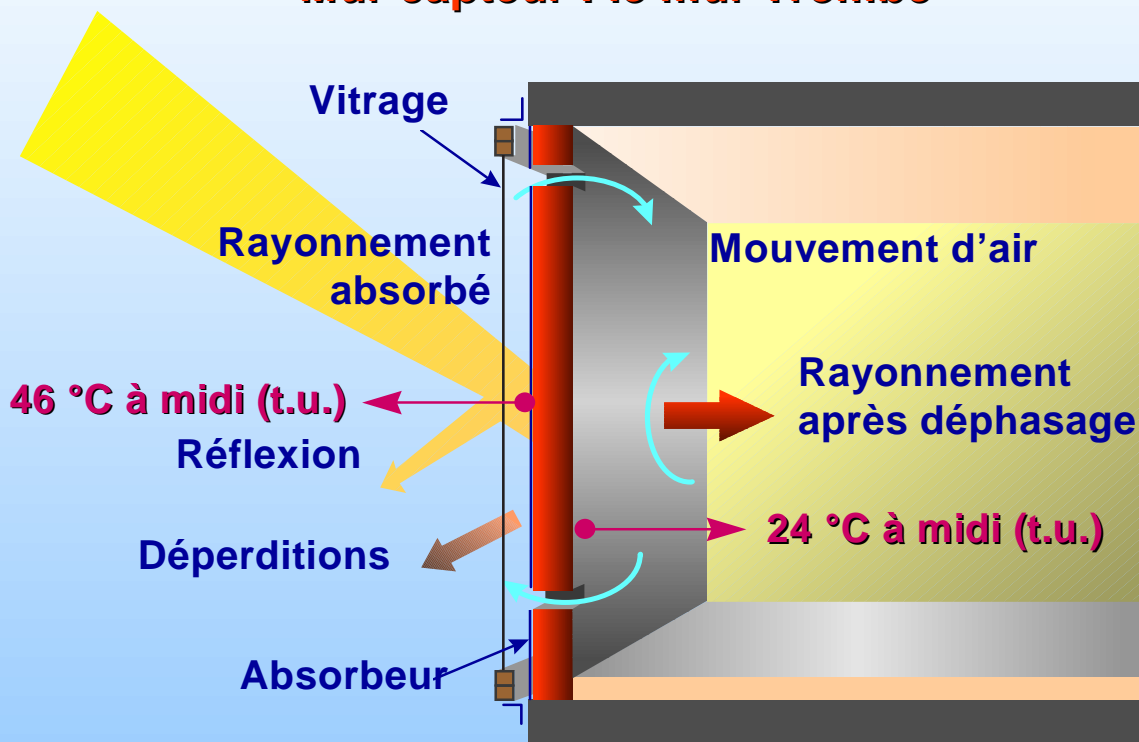
Les premières maisons prototypes remontent aux années 1960 à Odeillo, dans les Pyrénées, par l'architecte Jacques Michel. De nos jours, d'autres constructions telles que la maison Ismalun dans les Hautes-Alpes, continuent à intégrer avec succès les murs capteurs (Fig. 1).

Les murs capteurs captent l'énergie solaire, l'accumulent dans leur masse, l'amortissent et la restituent sous forme de chaleur à l'ambiance intérieure après un déphasage de plusieurs heures.



Deux murs capteurs sont intercalés entre les fenêtres au sud (arch. R. Marlin). **1**

Mur capteur : le mur Trombe



2 Schéma de principe du mur capteur.

Les capteurs à air (capteurs-fenêtres ou capteurs-murs) sont des systèmes hybrides fonctionnant tantôt en mode passif (gains solaires directs), tantôt en mode actif (stockage et pulsion d'air).

Le capteur-fenêtre est composé de deux fenêtres distantes entre elles de 10 à 20 cm et l'air circulant entre ces deux fenêtres est relié à un stock thermique (lit de gravier, etc.). Par faible ensoleillement, le capteur-fenêtre se comporte comme une fenêtre ordinaire (mode passif). Lorsque le rayonnement solaire dépasse une valeur seuil (par exemple, plus de 300 W/m²), un store absorbant est mis en place entre les fenêtres ; le système devient alors collecteur et un ventilateur pulse l'air chauffé vers le stock (mode actif). La chaleur, ainsi stockée, complète la chaleur apportée par les gains solaires directs et permet de traverser de courtes périodes d'intempéries sans apport extérieur.

Les systèmes de capteurs à air en façade doivent être orientés au sud à $\pm 30^\circ$. Le rapport entre surface vitrée et volume chauffé doit être d'environ 1 m² pour 13 m³. Il est important de limiter les déperditions de chaleur (doubles vitrages isolants à l'extérieur et à l'intérieur, isolation nocturne, isolation du stock) ainsi que les risques de surchauffe en été (protections solaires extérieures car les stores disposés entre les deux fenêtres ne peuvent servir de protection).

Le transport de la chaleur étant assuré par l'air, il faudra dimensionner un réseau de conduits isolés, munis d'un ventilateur. Une commande photovoltaïque peut assurer la mise en service des ventilateurs en mode actif et la mise en place des stores dès que le niveau d'insolation est suffisant.

Le stock thermique doit être installé (verticalement ou horizontalement) au centre du bâtiment, de manière à ce que ses déperditions profitent de préférence en direction des pièces froides et peu ensoleillées. On considère qu'il faut compter environ 1 à 2 tonnes de galets par m² de capteur.

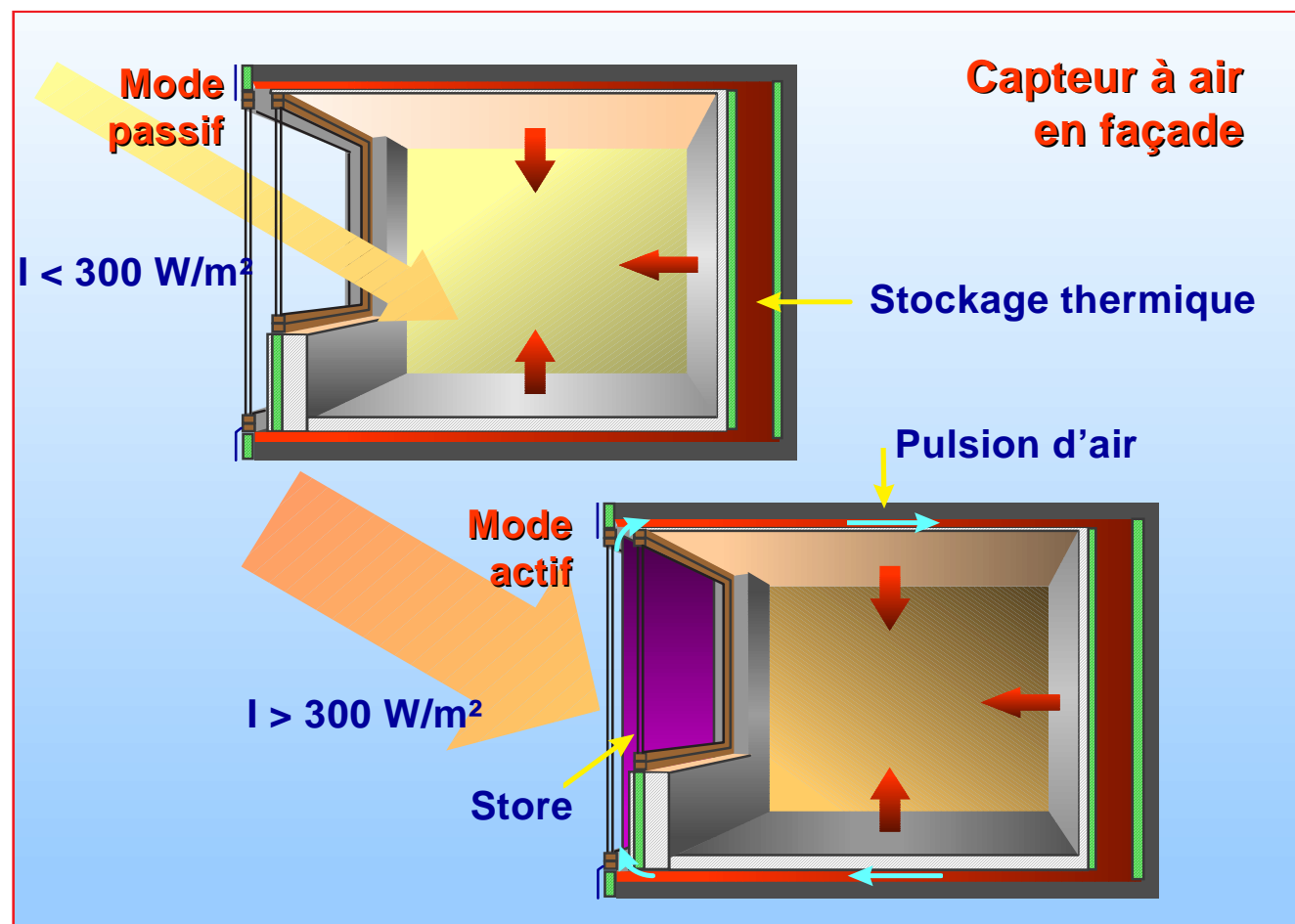
Ces systèmes à inertie thermique élevée assurent aux apports solaires un déphasage de plusieurs heures et peuvent servir de système de chauffage de base pour couvrir des périodes de 3 à 4 jours de mauvais temps. Par contre, ils ne peuvent pas se passer d'un système complémentaire de production de chaleur (à temps de réponse court).

En période froide, les capteurs à air assurent un bon confort (effet régulateur des températures et capacité de stockage). En été, le risque de surchauffe peut être important en l'absence de protection solaire efficace.

Les capteurs à air (murs ou fenêtres) sont des systèmes hybrides fonctionnant tantôt en mode passif (gains solaires directs), tantôt en mode actif (stockage et pulsion d'air).



Les capteurs à air sont intégrés à la façade de la maison des jeunes à Reinach, Suisse (arch. Archico).



2 Mécanismes passif et actif du capteur-fenêtre.

La technologie des matériaux isolants transparents (TIM) passe aujourd'hui du stade de la recherche à celui de son application commerciale (Fig. 1). Ces matériaux se distinguent par :

- une résistance thermique élevée ;
- une bonne transmission de la lumière pour une utilisation dans les systèmes de fenêtre.

Les TIM peuvent effectivement être appliqués dans des systèmes de fenêtres. Ceux développés actuellement ne sont pas transparents, mais translucides. Ils laissent pénétrer la lumière de manière très diffuse, ce qui permet d'améliorer l'éclairage en fond de pièce. L'utilisation des TIM en partie supérieure d'une fenêtre favorise une bonne diffusion. Le gain énergétique annuel d'un TIM en remplacement d'un double vitrage est de 12 à 20 m³ de gaz par m² de surface de fenêtre et on ne constate qu'une faible augmentation des surchauffes.

Les TIM peuvent être appliqués aux murs d'un édifice (Fig. 2). Le rayonnement solaire est transmis à travers l'isolant et absorbé par la surface noire (absorbeur) d'un mur opaque de brique ou de béton. La chaleur absorbée trouve son chemin à travers le mur vers l'intérieur du bâtiment tandis que le flux de chaleur vers l'extérieur est limité par les caractéristiques thermiques du matériau isolant. En effet, l'absorbeur réémet la chaleur dans une gamme de longueurs d'onde auxquelles les TIM sont quasi opaques.

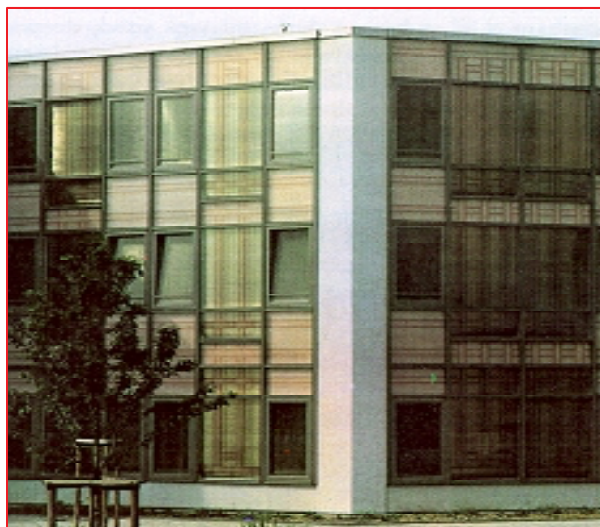
Expérimentalement, si le rayonnement solaire est faible, les gains solaires sont suffisants pour compenser les pertes thermiques du bâtiment. Si le rayonnement augmente, le mur intérieur se comporte comme un radiateur à basse température car sa température est supérieure à celle du local, ce qui permet d'assurer le confort des occupants tout en réduisant la température de l'air. La masse thermique du mur permet d'atténuer les variations de température mais une protection solaire reste indispensable pour prévenir des surchauffes.

Les TIM peuvent également être appliqués dans les systèmes de collecteurs : dans ce cas, le rayonnement solaire qui traverse l'isolation transparente atteint un absorbeur qui le transforme en chaleur. L'énergie ainsi recueillie peut être transportée par un fluide caloporteur vers l'utilisateur.

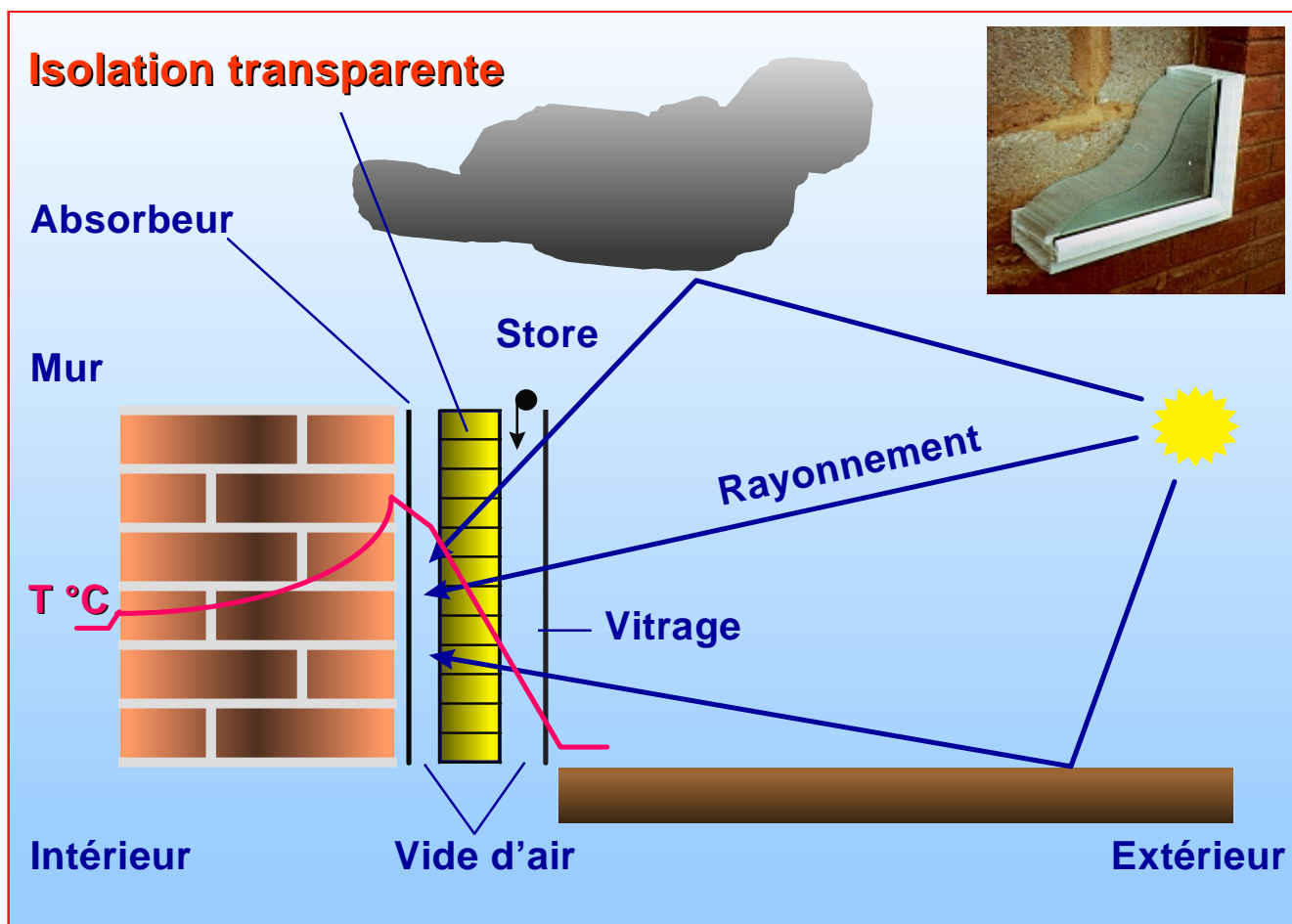
Les matériaux isolants transparents se rangent aujourd'hui en deux grandes catégories :

- les structures perpendiculaires absorbantes (structures capillaires, nids d'abeilles, etc.) ;
- les structures quasi homogènes (structures alvéolaires, etc.).

L'isolation transparente allie l'utilisation contrôlée du rayonnement solaire par effet de serre à la réduction des déperditions thermiques.



Exemple d'un bâtiment équipé d'isolants transparents : les stores sont relevés. 1



2 Principe de fonctionnement de l'isolation transparente.

Puisé à l'extérieur, l'air est réchauffé au cours de son passage dans le capteur. Puis pulsé par un ventilateur dans des gaines, il transporte la chaleur vers le stock (généralement un lit de galets). L'air est ensuite diffusé dans le bâtiment puis extrait et rejeté vers l'extérieur. Le système est composé de panneaux solaires, d'un ventilateur, du circuit, et d'un lieu de stockage thermique. Le fluide caloporteur est constitué par de l'air.

La figure 1 montre un exemple d'intégration de capteurs à air en façade. Le chauffage est réalisé par l'air chaud provenant de 14,5 m² de capteurs solaires chauffant le stock situé dans le sol. Les apports directs sont stockés dans les murs de terre crue, permettant un gain de 2 à 3 °C.

La figure 2 indique les principaux éléments du capteur-plan. Le vitrage protège l'absorbeur du vent et limite ainsi les pertes par convection. Il améliore également le rendement du capteur par effet de serre. L'absorbeur est un matériau de teinte foncée, qui transforme le rayonnement en chaleur disponible pour le fluide caloporteur. Derrière le capteur, une isolation thermique limite les pertes par l'arrière.

L'intérêt de l'air en tant que fluide caloporteur est qu'il ne présente aucun risque de gel et qu'une éventuelle fuite dans les conduites ne prête pas à conséquence. Cependant, sa faible capacité thermique oblige le concepteur à prévoir des conduites relativement encombrantes. De même, sa faible conductivité thermique le rend peu efficace quand il doit céder sa chaleur au stock. Enfin, les conduites d'air présentent des problèmes d'hygiène (poussières, microbes, etc.) quand elles ne sont pas périodiquement contrôlées.

Le rendement des systèmes dépend de la température moyenne du fluide caloporteur (moyenne entre l'aller et le retour) : il atteint 60 à 80 % si cette température est voisine de celle de l'air ambiant, mais chute à environ 30 à 50 % si la température est supérieure. On a donc tout avantage à travailler à des températures où la capacité du fluide à emmagasiner la chaleur est à son maximum (28 à 30 °C).

Le capteur solaire doit être orienté plein sud $\pm 45^\circ$ et son inclinaison par rapport à l'horizontale doit être proche de $50^\circ (\pm 10^\circ)$. Les capteurs ne doivent pas être ombragés ; cependant, les obstacles dont la hauteur sur l'horizon est inférieure à 10° , influencent peu le rendement car le soleil levant ou couchant rayonne peu d'énergie.

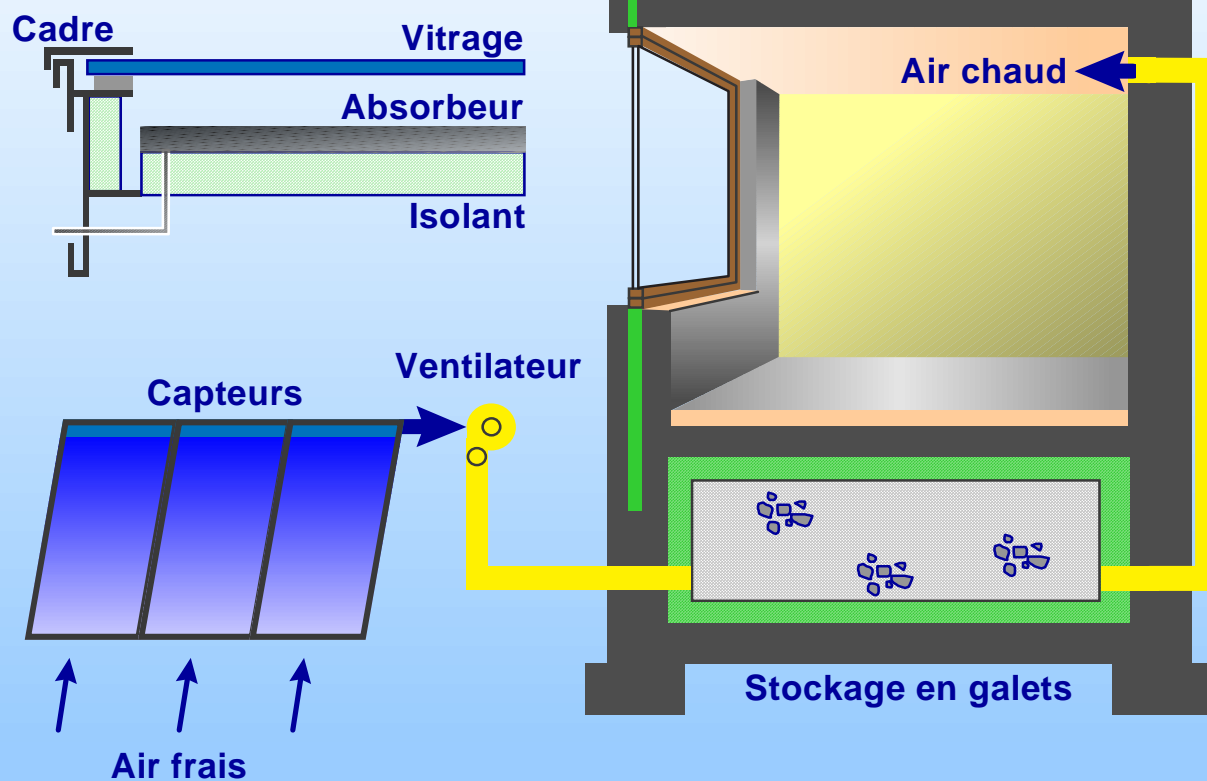
Les capteurs solaires peuvent être implantés sur un toit plat ou sur un toit en pente, voire à même le sol à proximité du bâtiment. Les réflexions du soleil sur le vitrage des capteurs sont souvent moins gênantes pour le voisinage que celles des baies vitrées verticales. Dans les régions où la neige est abondante, il est conseillé de donner aux capteurs une pente supérieure à 45° pour éviter qu'une couche de neige ne les empêche de capter le rayonnement solaire.

Les capteurs à air réchauffent l'air prélevé à l'extérieur. Un ventilateur conduit cet air à un stock thermique et le diffuse dans le bâtiment. Il est ensuite extrait et rejeté à l'extérieur.



Maisons individuelles groupées à Vannes, Morbihan (arch. D. Lasne). **1**

Le capteur solaire à air



2 Coupe d'un capteur-plan et principe de fonctionnement d'un capteur à air.

De même que pour les capteurs solaires à air, le système est composé de panneaux solaires, d'une pompe (au lieu d'un ventilateur), du circuit, d'un lieu de stockage thermique et d'un réseau de serpentins.

Dans la plupart des cas, le fluide caloporteur est de l'eau glycolée permettant une protection contre les risques de gel. Mise en circulation par une pompe dans des conduites de section adéquate, l'eau cède sa chaleur soit à un stock d'eau chaude sanitaire soit au plancher solaire direct par l'intermédiaire du réseau de serpentins (Fig. 2).

L'intérêt de l'eau en tant que fluide caloporteur réside surtout dans sa très bonne capacité et conductivité thermique, qui la rend apte à emmagasiner la chaleur lors de son passage dans le capteur et à la céder au stock. Le diamètre des conduites d'un système à eau est relativement réduit par rapport à celui d'un système à air. Le risque de gel est minimisé par l'addition de glycol. Les fuites dans les conduites sont facilement repérables mais les conséquences de tels incidents restent gênantes pour le bâtiment.

Le rendement des systèmes dépend également de la température moyenne du fluide caloporteur. Comme les capteurs solaires à air, les rendements avoisinent 60 à 80 % si la température moyenne est voisine de celle de l'air ambiant, mais chute à 30 à 50 % si la température est supérieure.

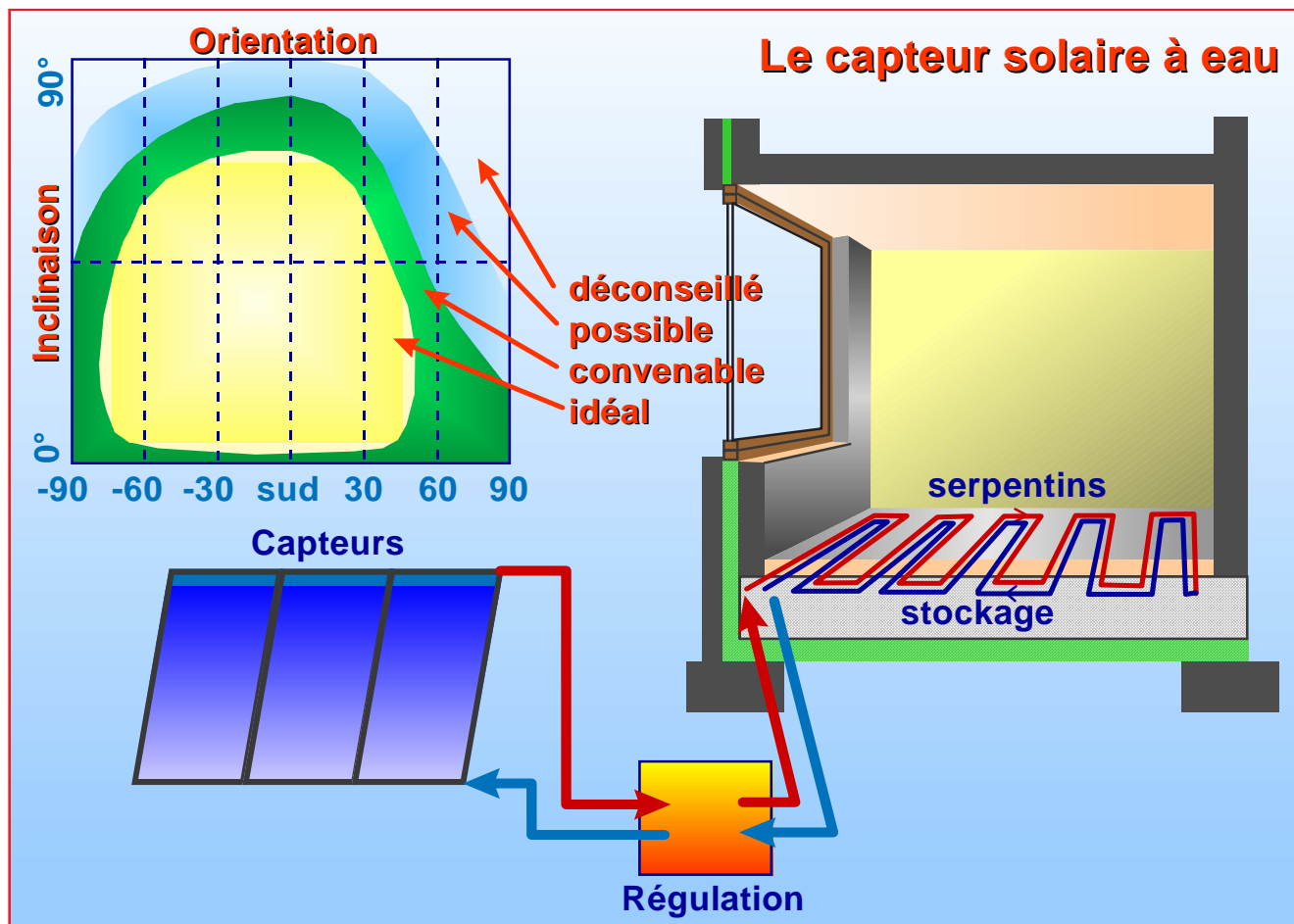
La figure 2 synthétise les niveaux d'acceptabilité en fonction des critères d'orientation et d'inclinaison des capteurs. Le capteur solaire doit être orienté de préférence plein sud ($\pm 45^\circ$), et son inclinaison par rapport à l'horizontale doit être comprise entre 10° et 60° en fonction du lieu. Pour un meilleur fonctionnement, le capteur doit être positionné dans la zone considérée comme idéale.

La figure 1 montre l'intégration de 17 m^2 de capteurs solaires à eau, en toiture, permettant d'assurer le chauffage de la maison par l'intermédiaire d'un plancher solaire direct.

Les capteurs solaires à eau réchauffent le fluide caloporteur, qui, par pompage, est conduit au stock thermique pour y céder une partie de sa chaleur. Le fluide caloporteur diffuse la chaleur dans le bâtiment par un réseau de serpentins.



1 Capteurs à eau en toiture, alimentant un plancher solaire direct, à Mulhouse (arch. B. Mosser).



2 Principe de fonctionnement d'un capteur à eau et recommandations d'orientation et d'inclinaison.

La conception des espaces extérieurs fait partie intégrante de la mission de l'architecte. La démarche bioclimatique intègre le traitement de la végétation et de l'eau dans la conception de l'habitat.

La figure 1 rappelle les principes suivants :

- Par sa masse thermique élevée, l'eau atténue les fluctuations de température ; en retirant de la chaleur à l'air pour passer à l'état de vapeur, elle réduit la température ambiante.
- La végétation procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation directe sur les bâtiments et les occupants ; elle réduit localement la vitesse du vent et diminue les pertes par convection du bâtiment.

Rôle de la végétation sur l'habitat (Fig. 2.1 et 2.3) :

La végétation joue un rôle protecteur sur les constructions environnantes. Haies et rangées d'arbres protègent le bâtiment du vent et de l'excès d'ensoleillement en été. Si les espèces sont à feuilles caduques, l'ombrage qu'elles offriront en été se réduira en hiver pour laisser entrer les rayons du soleil. A cet égard, il est préférable de choisir une espèce à large feuille, faisant peu de bois, pour maximiser l'ombrage en été et minimiser le blocage du soleil en hiver. Il ne faut pas oublier que, même dépourvus de leurs feuilles, les arbres réduisent l'insolation effective de 20 à 40 %.

La végétation grimpante contribue également à réduire les pertes par convection au droit de l'enveloppe du bâtiment et améliore son comportement énergétique. La vapeur d'eau émise par évapo-transpiration des feuillages permet de rafraîchir l'air ambiant.

Par ailleurs, la végétation filtre la lumière naturelle. En effet, la lumière diffuse assurée par une couverture végétale atténue les effets de réverbérations ou d'éblouissement dus à la présence d'ombre et de soleil.

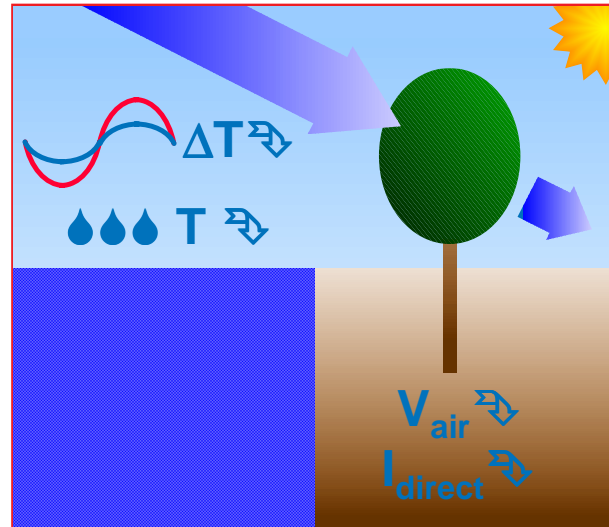
Rôle de l'eau sur l'habitat (Fig. 2.2 et 2.4) :

L'utilisation de plans d'eau permet de créer des microclimats et d'atténuer les variations journalières de température. Différents systèmes d'aspersion permettent également de rafraîchir l'air ambiant.

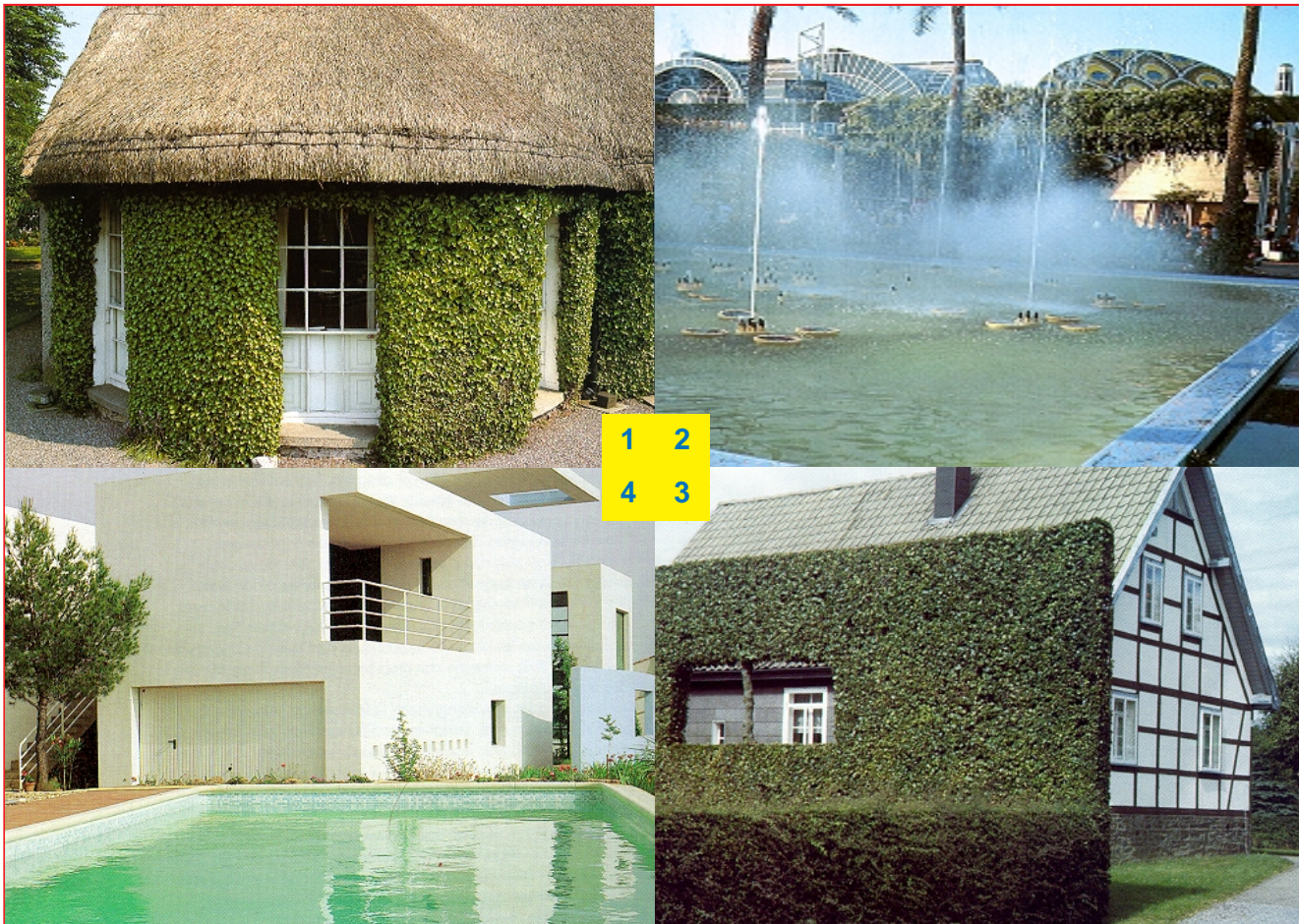
L'eau trouve dans l'air ambiant la chaleur nécessaire pour passer de l'état liquide à l'état de vapeur ; la température de l'air se voit ainsi réduite et l'humidité relative de l'air augmente. Pour maximiser cet effet, il convient d'augmenter la surface de contact air / eau (plans d'eau, etc.) et le mouvement relatif de l'air par rapport à l'eau (jets d'eau, ect.). De nombreuses réalisations dans les climats chauds et secs utilisent l'eau pour rafraîchir les ambiances.

Par ailleurs, l'eau a souvent été utilisée pour ses capacités de stockage de la chaleur (murs de bidons, etc.) et a inspiré des systèmes constructifs complexes, tels que le "roof pond" où des réservoirs d'eau, constituant la dalle de toiture, permettent d'atténuer la variation des températures.

La végétation protège du vent et du soleil ; l'eau tempère les variations de température par effet tampon et permet de rafraîchir l'air.



Eau et plantations modifient les températures et l'effet des vents. 1



2 Eau et plantations complètent la conception de l'édifice.

La texture et la nature des sols déterminent une partie de l'ambiance extérieure autour des bâtiments et pèsent également sur leur ambiance intérieure.

Le sol est capable d'absorber une partie du rayonnement incident et de réfléchir le reste ; le rayonnement absorbé participant au réchauffement du sol lui-même. En milieu urbain, caractérisé par un coefficient d'absorption élevé de l'ordre de 0,8 (ou, à l'inverse, par un faible albédo : coefficient de réflexion), les constructions et surtout les infrastructures routières constituent un formidable réservoir de chaleur. En été, une surface goudronnée peut atteindre une température supérieure à 80 °C à cause de sa couleur foncée et de son horizontalité. L'imperméabilité de ce type de surface contribue aussi à sa capacité thermique : la matière dense n'est donc pas refroidie par percolation de l'eau.

Les sols sont aussi capables de réfléchir le rayonnement lumineux. Des aménagements clairs à proximité d'une fenêtre auront une influence positive sur la distribution de la lumière à l'intérieur. Un plan d'eau contribuera également à réfléchir une partie du rayonnement vers l'intérieur.

Le sol a également des capacités d'isolation thermique déjà utilisées dans l'architecture vernaculaire du grand nord. Les toitures sont recouvertes d'une couche de terre herbeuse pour les protéger des grands froids et du vent. De tels procédés sont encore utilisés de nos jours, que ce soit en toiture plate ou en toiture oblique (Fig. 1).

Le sol peut encore être utilisé pour son inertie thermique, surtout en profondeur. Un système de ventilation peut être couplé à un réseau de conduites souterraines, installé à 2 ou 3 mètres de profondeur, et dont les bouches d'entrée d'air sont réparties à proximité du bâtiment. En été, l'air chaud y est admis pour s'y rafraîchir car la température de la terre est inférieure à la température de l'air. En hiver, le phénomène s'inverse et l'air frais s'y préchauffe.

L'inertie thermique du sol est un élément dont l'architecte peut également tirer parti en enterrant, tout ou partie du bâtiment. La figure 2 illustre ceci par la maison Jacobs. Le bâtiment est construit sur un plan en hémicycle. Le mur, exposé au nord, est protégé par un remblai alors que le mur sud (illustration en médaillon) s'élève sur deux étages et capte les rayons du soleil par ses grandes surfaces vitrées.

Les sols absorbent ou réfléchissent la lumière.

L'inertie du sol peut être mise à profit pour stabiliser l'ambiance intérieure.



Maison de vacances sur le littoral danois **1**
(arch. F. Skude).



2 Maison Jacobs dans le Wisconsin, Etats-Unis (arch. F.L. Wright).

L'architecture est une activité traditionnellement empirique : on construit, puis on constate. Aujourd'hui, l'accélération des modes de construction et la multiplication des produits et technologies nouvelles rendent cette démarche de plus en plus inacceptable. C'est pourquoi des outils ont été développés pour permettre à l'architecte de simuler les résultats de son travail dès la phase de conception. Disposant de données plus précises sur le comportement probable de son projet, l'architecte corrige alors son esquisse en connaissance de cause.

Les programmes de simulations peuvent se classer en deux familles :

- Les programmes statiques ou stationnaires déterminent des quantités (températures, flux, consommations, etc.) indépendamment du temps. Ces programmes permettent d'apporter une réponse aux questions que se pose le concepteur : consommation annuelle prévisible pour un cas de figure donné ? Puissance de chaudière à installer ? Température de paroi d'une pièce dans des conditions de températures intérieure et extérieure données ? Risque de condensation ?

Ces programmes calculent les équations d'échange de chaleur à partir de valeurs moyennes, comme si les phénomènes de transfert de la chaleur n'étaient pas influencés par la dynamique climatique (cycle jour/nuit, cycle saisonnier, etc). Certaines données comme les températures extérieures moyennes mensuelles ou le rayonnement solaire moyen sur une surface d'orientation et d'inclinaison données, pour un mois déterminé, seront nécessaires.

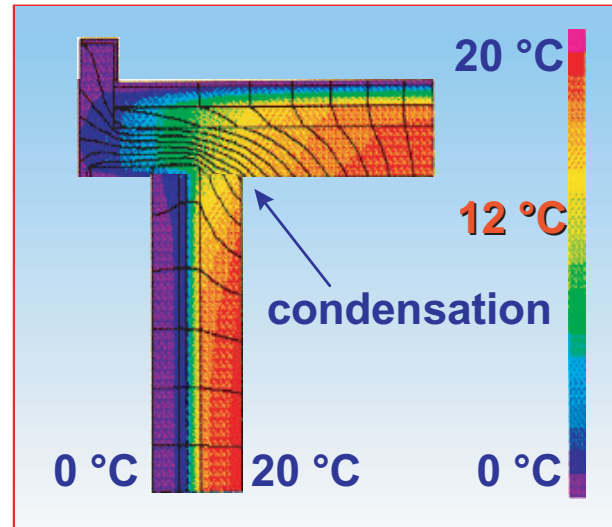
La figure 1 reproduit une sortie écran d'un programme statique (Kobru86) étudiant la répartition des températures dans un détail de construction (ici : une coupe verticale dans un raccord mur/toiture). À partir de la géométrie du détail, des conditions de température intérieure et extérieure, une matrice de calcul détermine, point par point, les températures dans la paroi.

Les programmes dynamiques, quant à eux, permettent une véritable simulation de conditions météorologiques, heure par heure, que ce soit une année type ou une période donnée. La réponse du bâtiment (température de l'air ambiant, etc.) est également enregistrée de manière dynamique. Il est donc possible de déterminer dans quelles conditions et à quel moment une situation de confort ou d'inconfort peut se produire. Ces programmes sont particulièrement utiles pour mieux comprendre le comportement des structures en thermique du bâtiment.

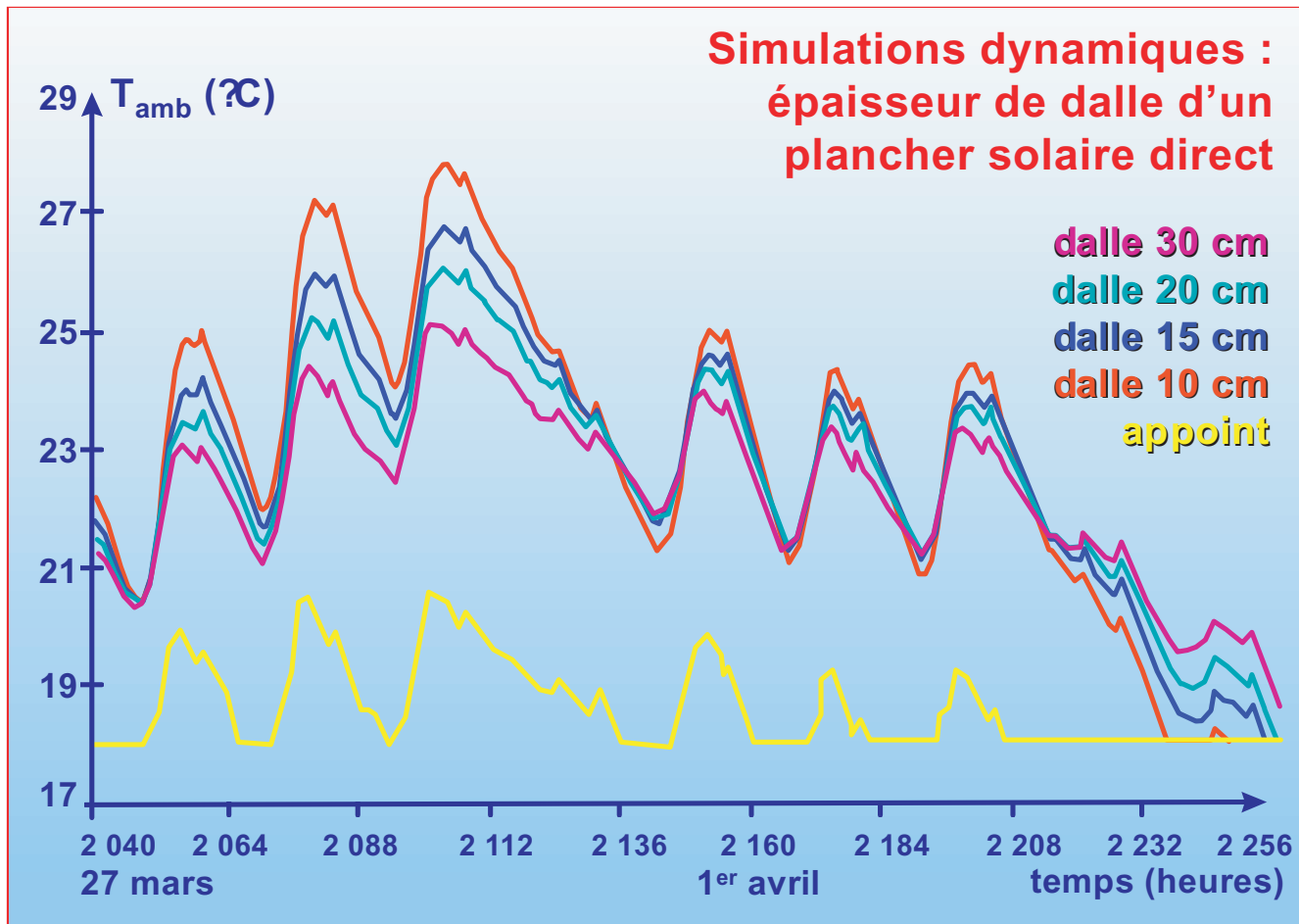
La figure 2 illustre le type de simulation réalisée par un programme dynamique. L'évolution des températures est donnée par une séquence précise, du 27 mars au 4 avril, pour un lieu précis (Carpentras). L'objectif de cette simulation est de vérifier la variation de l'amplitude des températures ambiantes en fonction de l'épaisseur et de la capacité thermique de la dalle d'un plancher solaire direct.

Les outils informatiques aident à prévoir le comportement du bâtiment.

L'architecte peut, en connaissance de cause, mieux orienter son travail de conception.



Exemple d'un programme statique : calcul des ponts thermiques (Kobru 86). 1



2 Étude de l'incidence de l'épaisseur de la dalle en béton armé d'un PSD® sur la variation de la température ambiante.

Il est important de pouvoir estimer les consommations énergétiques d'un bâtiment à partir de ses caractéristiques "théoriques" (géométrie, matériaux, orientation et climat local). Ce type de calcul permet de déterminer l'impact relatif : des gains solaires (selon la surface de vitrages ou leur orientation) ; de l'isolation (en faisant varier le paramètre de l'épaisseur) ; de la compacité. Le concepteur doit également pouvoir déterminer la puissance des systèmes à installer, notamment celle du système de chauffage. Un calcul plus poussé peut aussi faire varier d'autres paramètres tels que le degré d'inertie de la maison ou le type d'allure de chauffage, etc. Le concepteur doit pouvoir vérifier si son projet ne risque pas de provoquer des situations d'inconfort à certaines périodes de l'année.

Une analyse dynamique se prête à l'examen minutieux de quelques journées représentatives (le jour le plus froid ou le jour le plus chaud) afin de déterminer la réponse du bâtiment dans ces conditions. Les courbes de températures seront étudiées, heure par heure, pour vérifier qu'il n'y a pas de surchauffe ou sensation de froid. Enfin, le concepteur doit pouvoir vérifier que son projet est exempt de défauts tels que ponts thermiques ou risques de condensation.

La figure 2 expose le schéma de travail d'un ensemble de simulations (développé par S. Szokolay en 1996) visant à déterminer s'il est plus intéressant, sous un climat chaud et humide comme celui des côtes du nord de l'Australie, d'opter pour une construction massive ou légère. Sous un tel climat, les calculs cherchent à mettre en évidence les périodes et la fréquence des surchauffes.

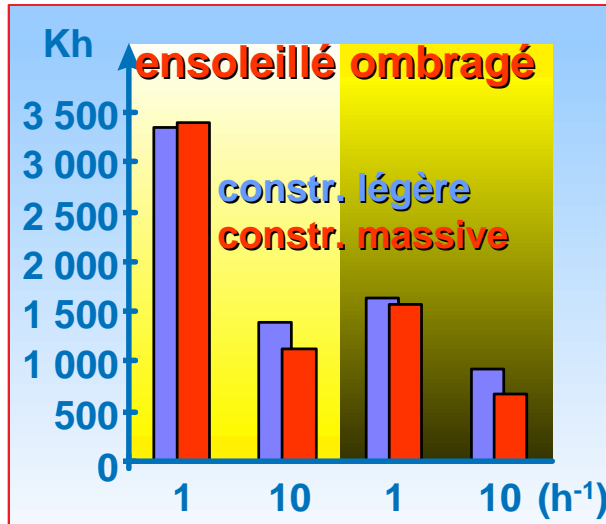
Une fois les différents paramètres intégrés dans le logiciel (températures, insolation, géométrie du bâtiment, matériaux utilisés, etc.), les températures sont calculées heure par heure pour une journée type du mois de janvier (mois le plus chaud dans l'hémisphère Sud). Puis, la durée pendant laquelle la température intérieure dépasse la température de confort est calculée ainsi que la différence entre ces températures. Le résultat obtenu correspond à des degrés-heures, exprimant l'importance des surchauffes.

L'intérêt de la simulation réside dans la possibilité de comparer plusieurs variantes, il est crucial de bien choisir les paramètres. Ici, les paramètres choisis sont :

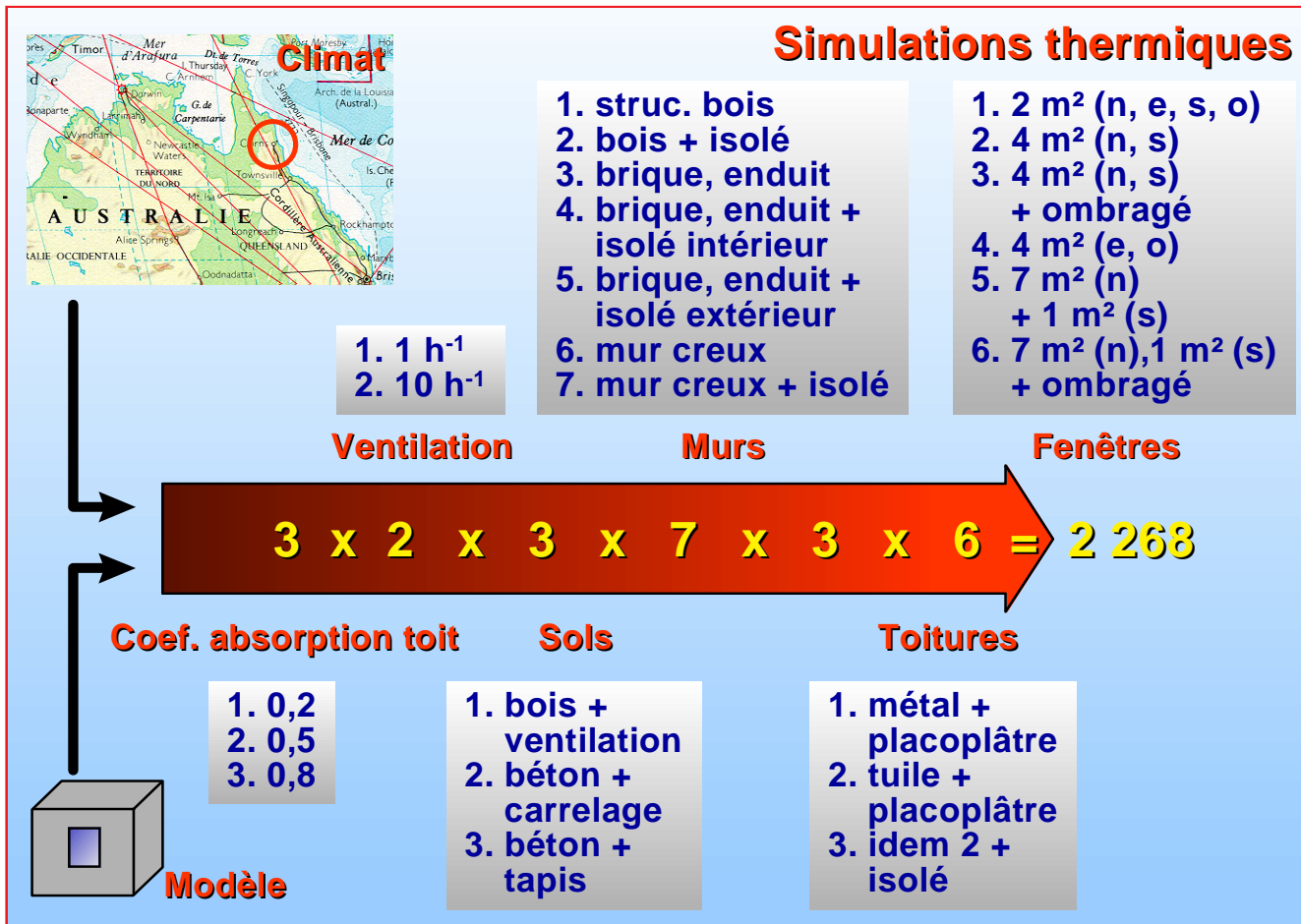
- le coefficient d'absorption du toit (0,2 ; 0,5 ou 0,8) ;
- le taux de ventilation (1 ou 10 renouvellements) ;
- la nature des planchers (en bois ; en béton recouvert de céramique ou en béton recouvert de tapis) ;
- la nature des murs (structure bois isolé ou pas, par 50 mm de laine minérale ; brique et enduit isolé ou pas, par l'intérieur ; brique et enduit isolé ou pas, par l'extérieur ; mur creux isolé ou pas) ;
- la nature des toitures (en métal incliné à 10° ou en tuiles inclinées à 20° et avec ou sans isolation de 100 mm de laine minérale) ;
- l'exposition solaire des fenêtres (6 variantes).

La combinaison de ces variantes donne 2 268 résultats possibles. La figure 1 illustre les résultats des calculs pour une variante légère et une variante massive, selon le taux de ventilation et la présence ou l'absence d'ombrage. Sur l'axe vertical, on peut lire les degrés-heures (Kh). La disparité des chiffres (682 à 3 391 Kh) témoigne de l'intérêt de la comparaison.

Les calculs de simulation permettent, au stade de la conception, de comparer de nombreuses variantes entre elles.



Quelques résultats parmi les variantes 1 calculées.



2 Schéma combinatoire d'un calcul de simulations thermiques.

Par le terme logiciel de simulation du comportement dynamique des bâtiments, on entend un programme qui calcule, pour certains intervalles de temps, toutes les grandeurs déterminantes du bilan énergétique. Pour qu'on puisse parler de dynamique, il faut que cet intervalle de temps soit généralement inférieur à 1 heure. Les méthodes de calcul du bilan énergétique sont aussi nombreuses que compliquées. Selon la manière dont elles traitent numériquement la dynamique du bâtiment, on peut les classer en deux grandes familles : les méthodes par corrélation et les méthodes par simulation (Fig. 2).

Les méthodes par corrélation permettent de calculer les besoins énergétiques annuels ou saisonniers. Le calcul n'est pas véritablement simulé mais plutôt globalisé par des facteurs correctifs empiriques.

- La première méthode, celle des degrés-jours corrigés, repose sur le calcul des pertes thermiques GV , réduites par un coefficient β représentant les gains de chaleur et déterminé par certains paramètres caractérisant le bâtiment.

- La seconde méthode, celle du bilan stationnaire, calcule séparément les pertes et les gains réduits par un coefficient d'utilisation. Cette méthode permet d'étudier l'impact des vitrages et des gains internes.

Les méthodes par simulation, en plus du calcul du bilan énergétique, permettent d'étudier l'évolution temporelle de toutes les paramètres importants.

- La méthode des jours types permet d'obtenir des résultats à partir de l'évolution dynamique de quelques jours types ou séries de jours de référence. Les besoins énergétiques sont ensuite extrapolés pour la saison de chauffage ou pour toute l'année à partir de statistiques climatiques.

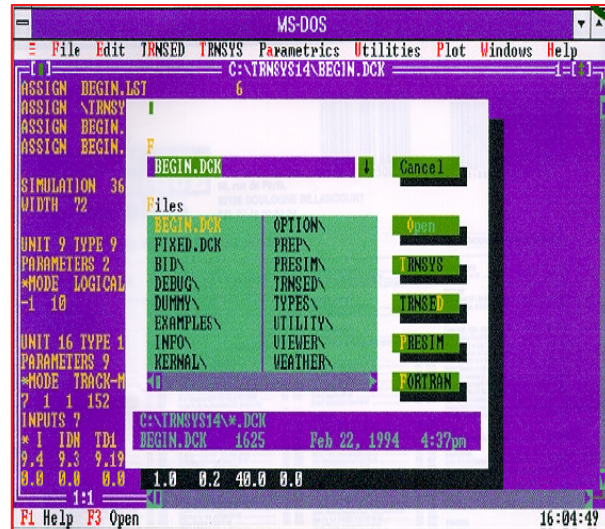
- Les méthodes des fonctions de transfert exploitent la théorie mathématique des facteurs de réponse. Cette théorie étudie la réaction d'un système à la suite d'une perturbation (flux de chaleur, modification de la température, etc.). Il est ainsi possible de calculer rapidement et précisément l'évolution dans le temps des charges de chauffage et de refroidissement.

- Les méthodes de bilan énergétique résolvent, pour chaque intervalle de temps, un système complet d'équations. Elles sont capables de déterminer toutes les grandeurs intervenant dans le bilan énergétique, notamment les températures de surface. Ces méthodes exigent un temps de calcul relativement long.

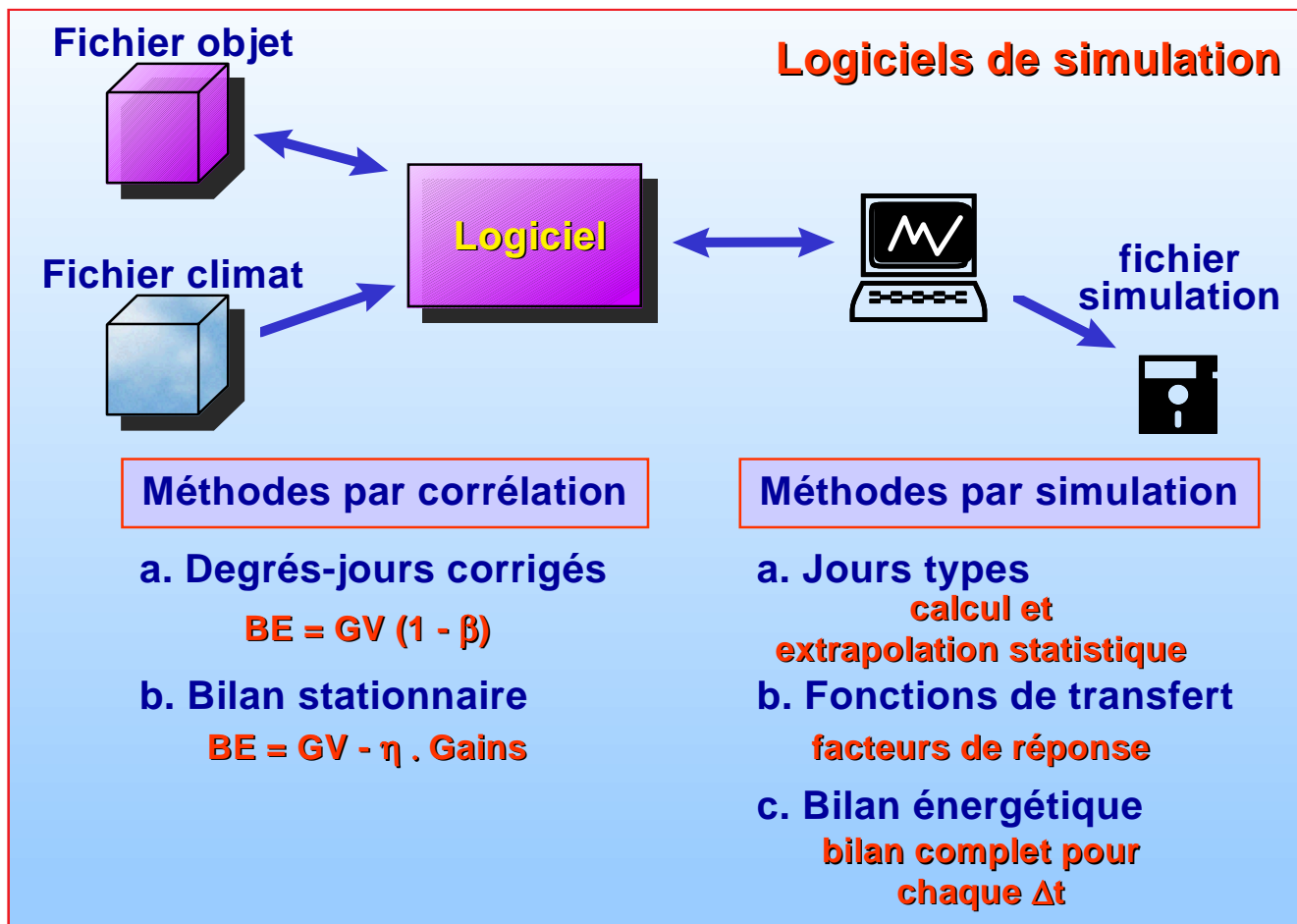
- Certains programmes utilisent des routines de calcul appliquant plusieurs des méthodes introduites ci-dessus.

Actuellement, beaucoup de programmes sont fiables, mais ils restent d'un accès difficile et la crédibilité des résultats obtenus est, pour une grande part, influencée par l'expérience de l'utilisateur.

Les logiciels de simulation du comportement dynamique des bâtiments calculent toutes les grandeurs déterminantes du bilan énergétique pour un intervalle de temps donné (< 1 h).



Ecran de contrôle d'un programme de simulation (TRNSYS). 1



2 Méthodes de calcul des logiciels de détermination des données thermiques.

Il existe un nombre important de logements mal isolés pour lesquels se posent des problèmes d'inconfort et de surconsommation d'énergie. Il importe dès lors de disposer de techniques qui permettent de savoir où se trouvent les points faibles du bâtiment pour pouvoir y concentrer les efforts de rénovation.

La thermographie à infrarouge repose sur des techniques de conversion de l'énergie électromagnétique thermique rayonnée par un objet en un signal graphique. Ces signaux sont amplifiés et transmis à une unité de traitement d'image, qui en permet la visualisation en fausses couleurs ou en zones de gris. Ces couleurs représentent les températures de surface des objets étudiés. Des couleurs identiques correspondent donc à des températures identiques, pour autant que les surfaces aient la même émissivité ; ce qui est le cas de la plupart des matériaux de construction, à l'exception des métaux dont l'émissivité est plus basse.

La thermographie à infrarouge permet donc de visualiser en temps réel les températures de surface de l'enveloppe d'un bâtiment.

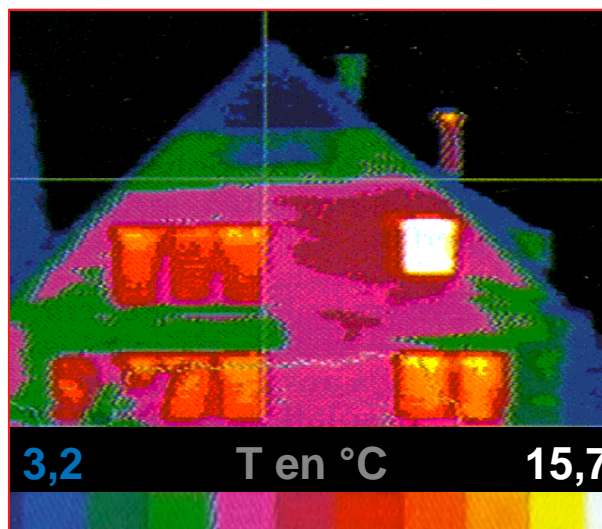
La figure 1 présente un cliché d'une maison très mal isolée. Le carré blanc à droite représente une pièce occupée dont la chaleur s'échappe par la fenêtre. D'autres fenêtres, de températures inférieures (rouge-jaune), sont visibles. La paroi du pignon (rouge-rose) est également fort déperditrice. On peut également remarquer les cheminées, plus chaudes que leur entourage.

La figure 2 représente l'application de la technique de thermographie à infrarouge à l'échelle d'un programme national de rénovation de logements collectifs. La ville de Riga, en Lettonie, a bénéficié d'une aide européenne (Programme Thermie) dans le but d'identifier les mesures les plus efficaces pour rénover l'important stock de logements construits au lendemain de la Seconde Guerre mondiale.

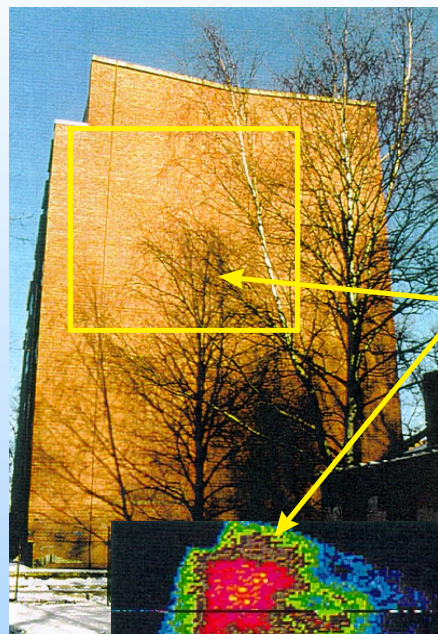
A gauche, le pignon d'un immeuble de 5 étages présente une dégradation importante de l'isolant, due à la mauvaise réalisation des joints et à la mauvaise qualité des matériaux.

A droite, l'étude d'une façade met en évidence l'intérêt de vitrer les balcons : leur image infrarouge montre des températures de surface (bleu à bleu sombre) nettement inférieures à celles de balcons non vitrés (au-dessus et en dessous) pour lesquels les déperditions thermiques sont plus élevées.

La thermographie à infrarouge est un outil de diagnostic qui permet de visualiser les températures de surface de l'enveloppe d'un bâtiment et d'en connaître les points faibles.

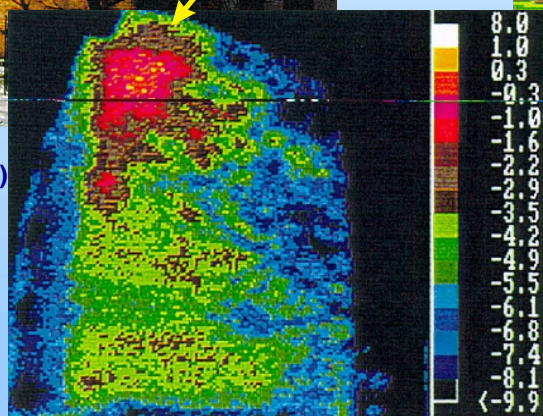


Vue en fausses couleurs d'une maison très mal isolée. 1

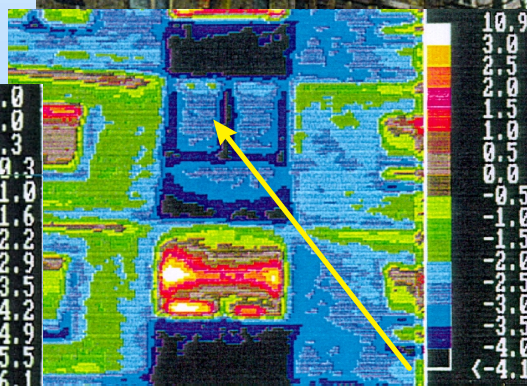


Absence ou détérioration des isolants

Riga (Lettonie)



La thermographie en rénovation



Balcon vitré

2 Diagnostic de logements collectifs par thermographie à infrarouge.

Le coefficient de forme, ou compacité, mesure le rapport de la surface de l'enveloppe déperditive au volume habitable (m^2/m^3). Il permet de qualifier les volumes construits en indiquant leur degré d'exposition aux conditions climatiques ambiantes.

En effet, dans les climats tempérés, les déperditions thermiques des bâtiments dues aux différences de température entre l'ambiance intérieure (stable) et les conditions extérieures (variables), se font principalement par conduction au droit de l'enveloppe du bâtiment. Il s'ensuit que, pour un même volume, les déperditions seront plus importantes à mesure qu'augmente la surface de l'enveloppe, dite surface déperditive. Par conséquent, l'architecte cherche à minimiser la surface de déperdition tout en maximisant l'enveloppe, ce qui se traduit par une faible compacité.

La figure 1 illustre ce principe : cette maison savoyarde, de conception très originale, réunit deux volumes compacts (un cylindre et une sphère) et offre $140 m^2$ habitables. Elle comprend une serre en façade sud, des vitrages à basse émissivité, une forte inertie thermique et un haut niveau d'isolation. Sa forme ramassée a permis de minimiser les surfaces déperditives.

La compacité est un critère d'évaluation thermique intéressant mais délicat à appliquer car il dépend de plusieurs facteurs. La figure 2 propose, à partir d'une analyse purement géométrique, de comparer la variation de la compacité par rapport à :

- la forme (à volume constant),
- la taille (à forme constante),
- au mode de contact (à forme et volume constants).

L'intérêt des formes sphériques a largement suscité l'imagination des architectes dans les années 70 : dômes, demi-sphères, structures polygonales complexes, visant toutes à économiser les matériaux et l'énergie en réduisant l'enveloppe. L'architecture vernaculaire, elle aussi, a toujours cherché à optimiser le rapport surface / volume, notamment par le travail de la toiture (à brisis, à deux ou quatre pans, etc.).

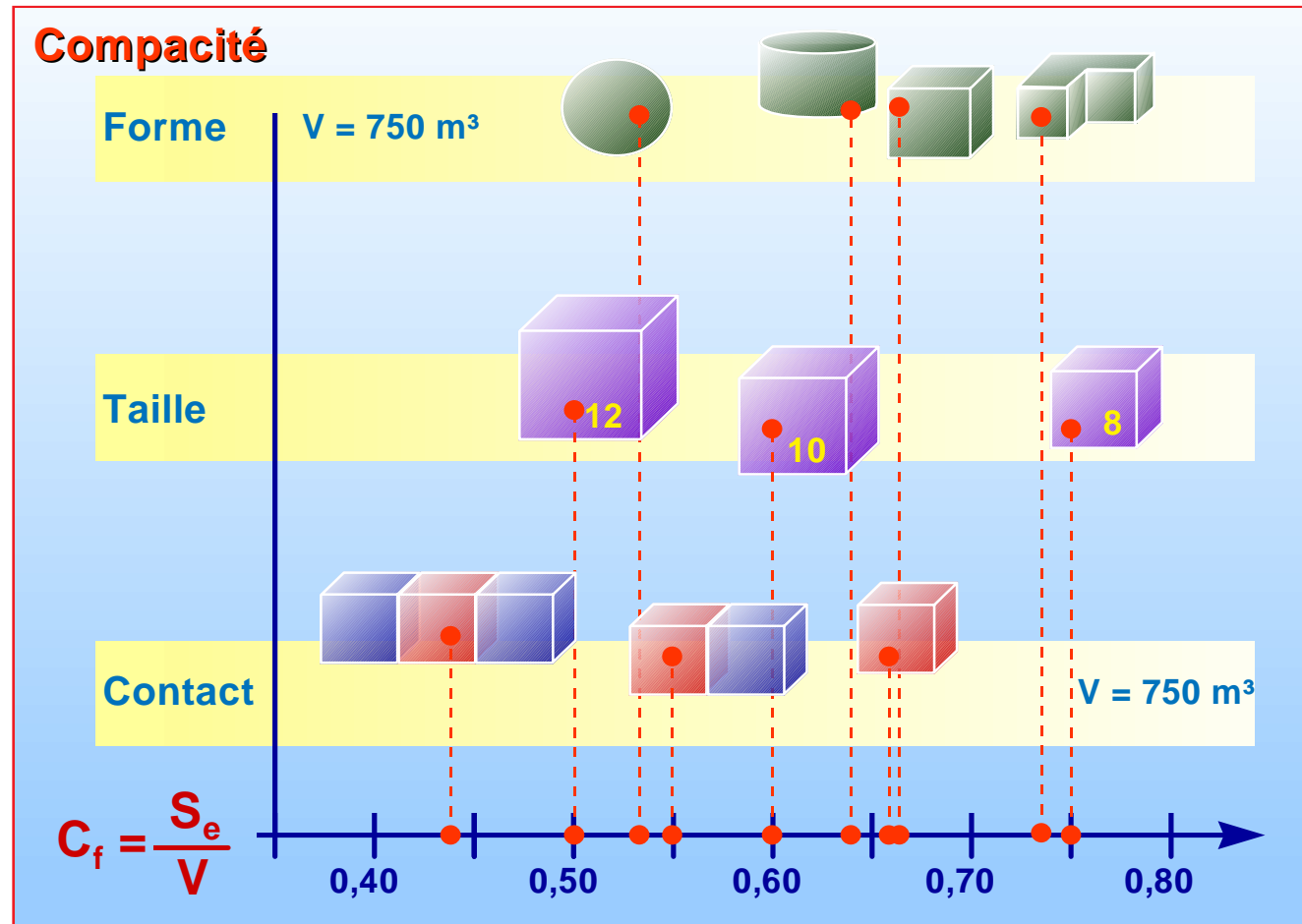
La taille influence aussi directement la compacité : cela signifie qu'elle n'a de valeur pour les architectes qu'à leur échelle d'intervention, c'est-à-dire celle du volume destiné à l'habitation humaine.

Le mode de contact entre volumes détermine également la compacité. Pour le même volume, la compacité de maisons mitoyennes est inférieure à celle d'un pavillon car les deux murs mitoyens sont disposés entre deux espaces chauffés et ne doivent donc plus être comptés dans la surface déperditive. C'est pourquoi, la législation de nombreux pays encourage certaines typologies urbaines (rangées de maisons mitoyennes, immeubles collectifs) en abaissant les niveaux d'isolation globale requis si la compacité du bâtiment est inférieure à un niveau de référence.

**Le coefficient de forme mesure le rapport de la surface déperditive au volume habitable (m^2/m^3).
Il indique le degré d'exposition du bâtiment aux conditions climatiques ambiantes.**



L'hostilité de l'environnement invite parfois à des formes ramassées (arch. Agence Chaneac).



2 La compacité varie suivant la forme, la taille et le mode de contact des volumes construits.

L'obligation d'isolation résulte en France de la réglementation thermique de 1974. Elle vise à limiter les déperditions des logements neufs. Le rôle de l'isolation thermique est de préserver le confort en réduisant les échanges thermiques avec l'ambiance extérieure : si celle-ci est froide, l'isolation garde la chaleur; si celle-ci est chaude ; l'isolation préserve la fraîcheur.

L'isolant peut se placer de diverses manières dans un mur (à l'extérieur, en sandwich ou à l'intérieur) sans influencer la qualité d'isolation thermique de la paroi. Cependant, sa position modifie l'inertie de la paroi ainsi que le risque de condensation. Un pare-vapeur doit donc être placé du côté chaud de l'isolation pour éviter les problèmes de condensation (Fig. 2 en médaillon).

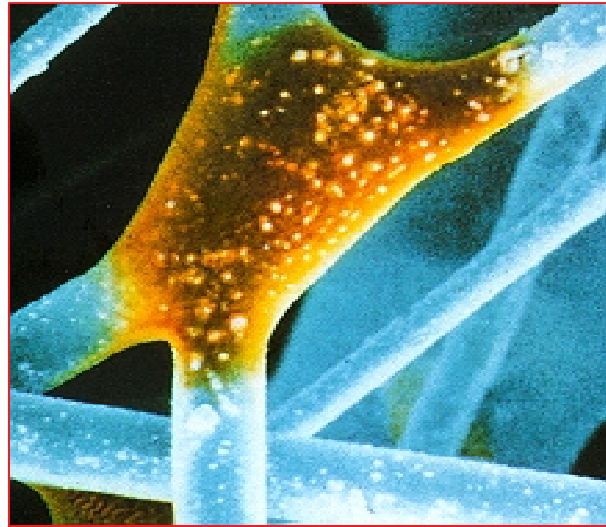
Le pouvoir isolant d'un matériau est exprimé par sa conductivité thermique. Les facteurs influençant le plus la conductivité thermique d'un matériau sont le poids volumique, la teneur en eau, la taille des pores d'air et la nature du solide les renfermant. La figure 1 reproduit l'agrandissement d'un faisceau de fibres minérales, dont la capacité à emprisonner des quantités d'air immobiles lui donne un haut pouvoir isolant (0,040 W/m.K). L'air présente, en effet, une grande résistance thermique pour autant que les mouvements de convection soient empêchés.

Les déperditions thermiques par conduction au droit de l'enveloppe représentent plus des deux tiers des déperditions totales. Une bonne isolation est un facteur essentiel à la maîtrise énergétique du bâtiment. La figure 2 compare, pour la maison expérimentale basse énergie Pléiade à Louvain-la-Neuve en Belgique, la réduction des besoins en énergie et les niveaux d'isolation globale (K_{moyen}) atteints pour différentes épaisseurs d'isolants. On considère une isolation de même épaisseur pour les murs, planchers et toitures. Tous les autres paramètres (vitrages, renouvellement d'air, etc.) restent inchangés. Au point 0, la maison n'est pas isolée et les consommations valent 100 %. Les premiers centimètres d'isolant étant les plus utiles, la courbe fait apparaître la réduction immédiate et importante des besoins en énergie. Puis, la pente de la courbe se réduit car l'avantage à isoler demeure, mais il est moins rentable. Le gain en termes relatifs correspond à des gains de plus en plus réduits en termes absolus, alors que les coûts de construction grimpent rapidement.

Il n'y a donc pas à rechercher une isolation maximale mais une isolation optimale qui tienne compte des besoins en énergie pour un climat déterminé, des possibilités constructives et d'un optimum financier qui dépend du coût de construction et du coût de l'énergie.

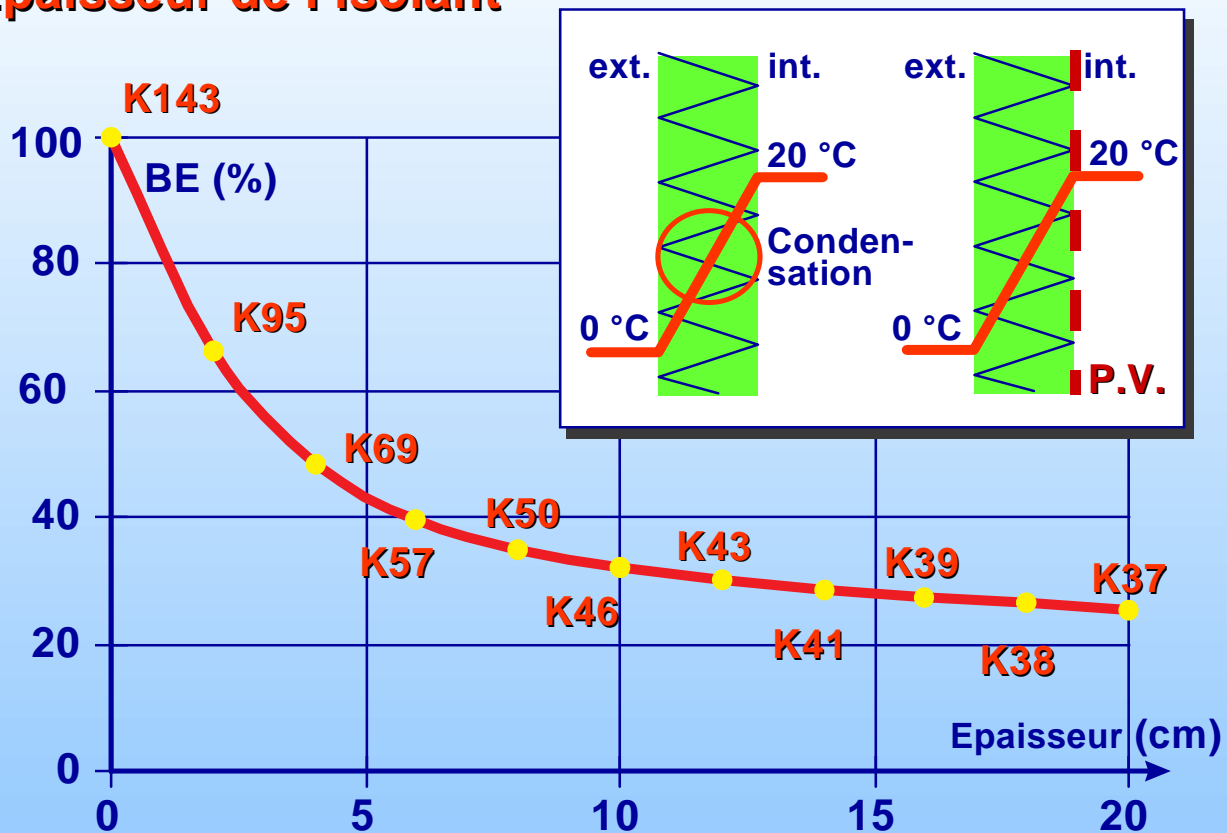
Les déperditions thermiques au travers de l'enveloppe constituent la première source de refroidissement des édifices.

L'utilisation des matériaux isolants permet de limiter significativement ces pertes de chaleur.



Vue au microscope de la texture aérée d'un matériau isolant : laine de roche (doc. Rockwool).

Epaisseur de l'isolant



2 L'isolation permet de réduire les besoins en énergie du bâtiment. Les premiers centimètres d'isolant apportent les gains relatifs les plus importants.

Les ponts thermiques sont des défauts dans la conception et/ou dans la réalisation de l'enveloppe isolante qui sont responsables de problèmes d'inconfort, de consommations supplémentaires et de dégradations éventuelles dans la construction.

Le pont thermique est une rupture totale ou partielle de l'isolation. En cet endroit de la construction, le flux de chaleur y est particulièrement dense : il n'est plus perpendiculaire à la surface des murs (flux surfacique) mais concentré. La figure 1 illustre bien ce phénomène : on y trouve un détail de raccord de toiture en coupe verticale où se produit un pont thermique. On peut voir les lignes de flux, en noir, quitter leur orientation perpendiculaire à la surface pour se concentrer au droit du raccord. L'échelle des températures indique que la température en ce point est voisine de 12 °C. Pour des conditions d'humidité ordinaire dans des logements de type résidentiel, il y a risque de condensation pour $T < 14$ °C.

La figure 1 indique clairement que l'influence d'un pont thermique n'est pas surfacique : on ne peut donc pas le calculer comme le coefficient K. Il existe donc des atlas de ponts thermiques ou des logiciels de calcul qui permettent d'obtenir la valeur exacte de déperdition linéique (et non surfacique) du pont thermique et d'évaluer le risque de condensation.

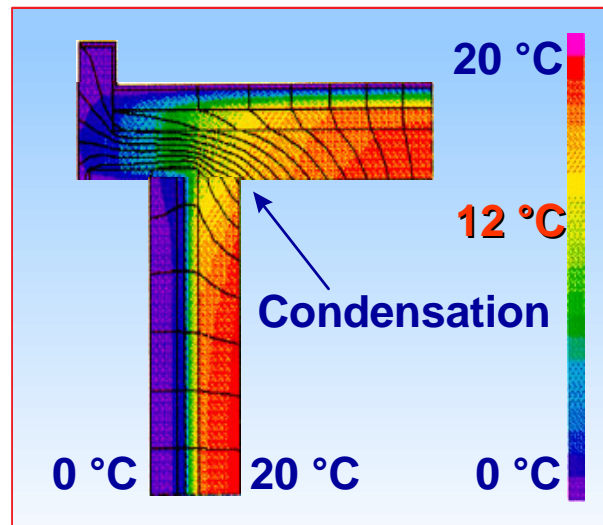
La figure 2 décrit les problèmes occasionnés par les ponts thermiques :

- Les moisissures se développent sur les zones où peuvent se produire la condensation. Ces moisissures peuvent être inesthétiques et présentent également un risque sanitaire (asthme, etc.). Elles dégradent également tous les états de surface (peintures, plafonnage) et mettent à mal les constructions en bois (champignons). L'humidité engendrée par la condensation modifie les caractéristiques d'isolation de la paroi.

- Les surfaces à proximité des ponts thermiques se caractérisent par une température de paroi inférieure à la température moyenne des parois, ce qui engendre une sensation de paroi froide et par conséquent une situation d'inconfort.

- La perte de chaleur supplémentaire, provoquée par les ponts thermiques, est à considérer de manière relative. Pour un bâtiment moyennement isolé, elle peut constituer 10 % des déperditions totales. Par contre, plus le bâtiment est isolé, plus les défauts d'isolation induisent des déperditions relatives importantes, qui peuvent représenter jusqu'à 25 % du total.

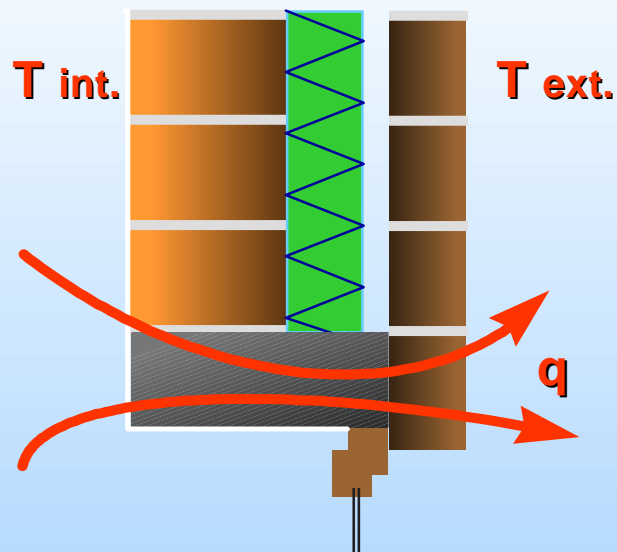
Les ponts thermiques sont des défauts dans l'enveloppe isolante, responsables de problèmes d'inconfort, de consommations supplémentaires et de dégradations dans le bâtiment.



Analyse du risque de condensation dans un détail de raccord de toiture. **1**

Pont thermique :

Partie de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment interrompant la couche d'isolation normalement présente



- Risque de condensation et de moisissures (température de surface intérieure plus basse)
- Inconfort (parois froides)
- Perte de chaleur supplémentaire

2 Description et conséquences des ponts thermiques.

Le bilan énergétique d'un local fait intervenir des déperditions par les parois et par ventilation, et des apports de chaleur. Ces apports peuvent être externes (apports solaires) ou internes (sources de chaleur liées à l'environnement intérieur provenant des occupants, de l'éclairage, des appareils électriques ou de l'évaporation d'eau).

Il est assez rare que ces gains de chaleur internes soient simultanés ou atteignent au même moment leur maximum. Il s'agit donc d'une source de chaleur diffuse dans le bâtiment. Par contre, leur superposition à d'autres sources de chaleur (chauffage en service, rayonnement solaire direct) peut conduire à une élévation excessive de la température et à une situation d'inconfort.

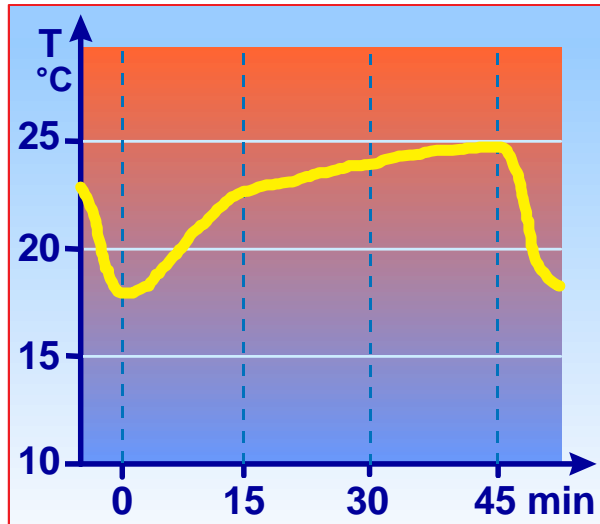
- La présence humaine s'accompagne d'une production de chaleur et d'humidité. L'évacuation de cette chaleur se fait de manière continue, essentiellement par convection (35 %), rayonnement (35 %) et par évaporation (25 %), selon les conditions de température de l'air, d'humidité relative et l'activité de l'individu. La figure 1 représente l'évolution des températures dans une salle de classe sur une période de cours de 45 minutes. Le volume est chauffé à une température de base de 18 °C et l'éclairage constitue un apport interne supplémentaire constant. La hausse des températures jusqu'à 25 °C est due à la seule présence des écoliers.

- Les machines électriques, en raison même de leur fonctionnement, émettent une certaine quantité de chaleur dans l'ambiance. Les machines de bureau dégagent l'équivalent calorifique de la puissance électrique moyenne absorbée et les moteurs électriques dégagent des quantités de chaleur qui dépendent de leur rendement propre de conversion d'énergie électrique en énergie mécanique. Les appareils à gaz génèrent de la chaleur et produisent de l'humidité.

- L'éclairage participe également au bilan général. On considère que toute l'énergie électrique consommée se transforme intégralement en chaleur, diffusée par convection avec l'air ambiant ou par rayonnement vers les parois et matériaux environnants. L'énergie rayonnée par un éclairage à incandescence correspond à 80 % de l'énergie transformée contre 50 % pour un éclairage fluorescent. Après un certain temps, les capacités de stockage de la chaleur sont saturées et la température du local augmente.

Les tableaux de la figure 2 rassemblent quelques données relatives à la production de chaleur et d'humidité des occupants et des équipements. Le tableau des activités humaines est exprimé en watt et en gramme d'eau par heure, pour chaque personne. Le tableau des équipements est exprimé en watt et en gramme d'eau par heure. Il convient de remarquer que les durées d'utilisation de ces équipements sont très variées. Le tableau relatif à l'éclairage reprend la charge d'éclairage moyenne en W/m^2 pour des lampes incandescentes et fluorescentes.

Les sources de chaleur liées à l'environnement intérieur sont : les occupants, l'éclairage, les appareils électriques ou au gaz et l'évaporation de l'eau.



1 Evolution des températures due à la présence des occupants, dans une salle de classe.

Par personne :

	W	g/h
assis au repos	114	37
debout au repos	128	46
assis, travail modéré	145	61
debout, travail léger	174	99
travail modéré	197	116
travail actif	232	141
travail intense	290	213
travail pénible	406	319

	W/m ²	
	inc.	fluo.
résidentiel	10	
écoles	25	12
bureaux	30	16

Estimation des apports internes

	W	g/h
four électrique	3 000	880
grille-pain	500	140
réfrigérateur	100	-
mach. à laver (5 kg)	6 000	4 320
fer à repasser	500	400
sèche-cheveux	500	230
ordinateur personnel	200	-
machine à écrire	100	-

2 Estimation des apports internes : chaleur métabolique et équipements.

Le rayonnement solaire effectif qui atteint la terre dépend du climat local, notamment de la nébulosité, et son intensité varie selon l'orientation et l'inclinaison de la paroi ensoleillée.

Le soleil peut contribuer au chauffage des bâtiments en hiver, par effet de serre au droit des parois vitrées ou au réchauffement des parois opaques. Pour autant, les gains solaires ne sont pas toujours utiles car en été, il convient de s'en protéger. Par ailleurs, dans certains types de bâtiments (écoles, bureaux, etc.), la chaleur interne produite est tellement importante, qu'un apport solaire supplémentaire ne pourrait entraîner qu'une surchauffe.

La figure 1 rappelle que l'énergie solaire nous parvient sous forme directe ou diffuse. Le diagramme représente les énergies moyennes reçues sur une surface horizontale à Bruxelles. Dans le nord de la France et en Belgique, la part de l'énergie solaire diffuse (environ 55 %) est plus importante que la part du rayonnement direct, même au cours des mois d'été (influence de la nébulosité). On constate qu'en Belgique, seuls les mois d'août et de septembre connaissent un ensoleillement direct plus important que l'ensoleillement diffus.

Lorsque les rayons du soleil frappent un élément transparent, ils sont partiellement réfléchis, absorbés et partiellement transmis. La fraction absorbée est ensuite réémise sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde de part et d'autre de la paroi transparente. Les vitrages étant pratiquement opaques au rayonnement de longueur d'onde supérieure à 2,5 microns, le rayonnement solaire, réémis à l'intérieur du volume chauffé, sera donc piégé par le jeu de la transformation vers les grandes longueurs d'onde. La température du local augmente. Ce piège à chaleur a pour nom : effet de serre.

Dans le cas d'une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée tandis que le reste est réfléchi : il n'existe donc pas de transmission directe. Une partie de l'énergie solaire absorbée sera diffusée de l'autre côté de la paroi avec un certain déphasage, à condition que la température de l'ambiance intérieure soit inférieure à la température extérieure, ce qui, dans nos régions, arrive parfois en été. Ce transfert de chaleur vers l'intérieur n'est cependant possible que si la paroi n'est pas isolée.

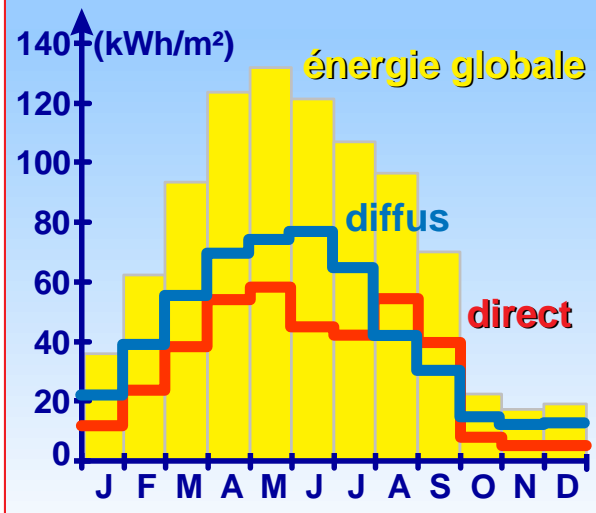
L'ensoleillement des parois opaques influence cependant les transferts de chaleur. En effet, en laissant échauffer sa face extérieure, le mur réduit les déperditions thermiques du bâtiment puisque celles-ci sont proportionnelles à la différence entre les températures de surface à l'intérieur et à l'extérieur.

La figure 2 illustre l'évolution des apports solaires pour une journée de juillet. Les apports solaires sont maximum ($> 400 \text{ W/m}^2$) sur les faces est en début de journée et ouest vers 16 h 00 (risque de surchauffe).

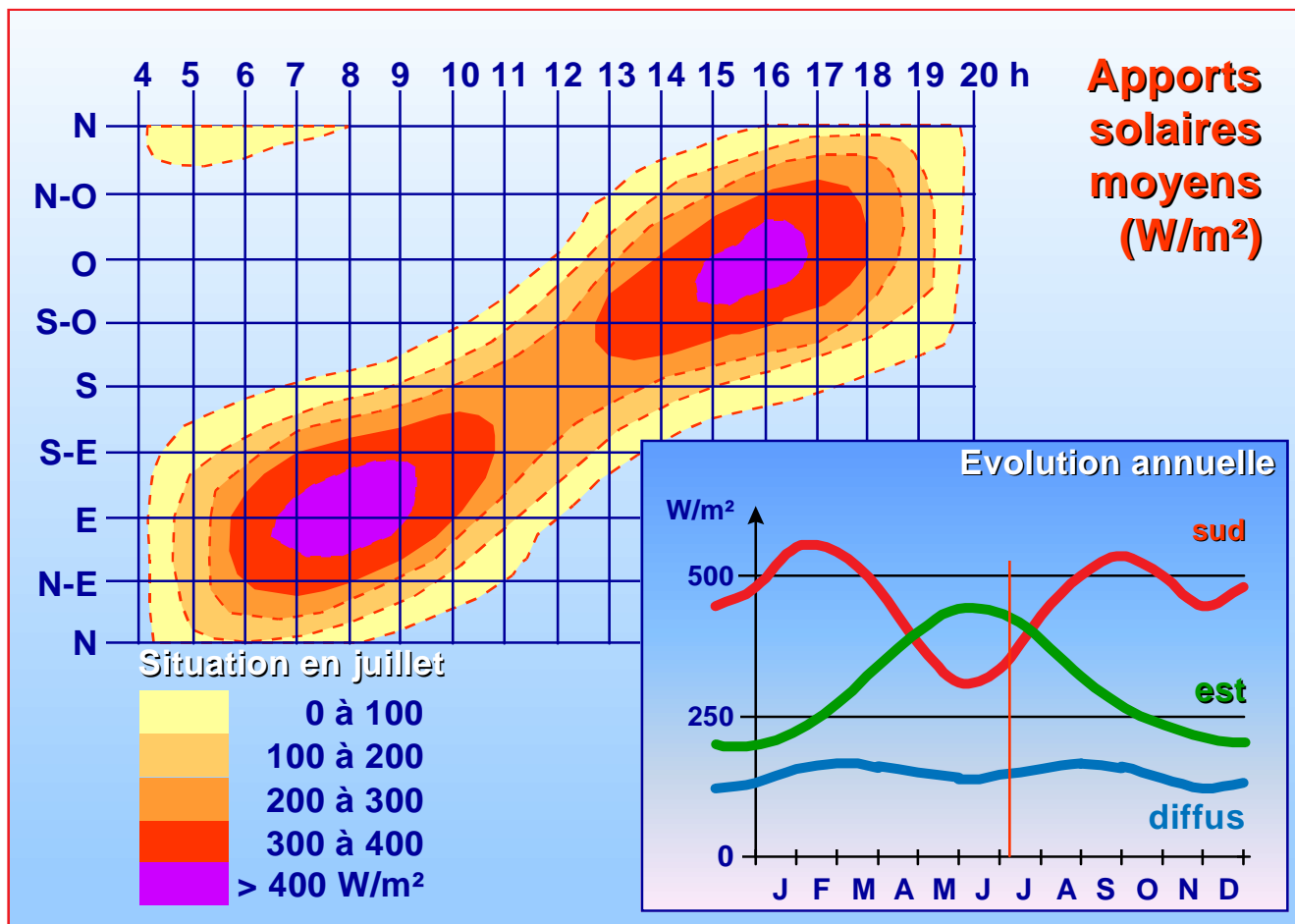
Par ailleurs, les courbes relatives à l'évolution des apports solaires sur l'année complète montrent que la face sud capte relativement peu d'énergie solaire en été (hauteur du soleil dans le ciel) mais davantage en hiver. Les ouvertures verticales orientées au sud offrent donc la meilleure capacité de régulation passive.

Les apports solaires sont principalement transmis par les fenêtres.

Ils varient selon la position relative du soleil et selon l'orientation et l'inclinaison de la paroi ensoleillée.



Énergie moyenne reçue à Bruxelles sur une surface horizontale. 1



2 Apports solaires moyens sur une surface verticale à Carpentras, France.

Le facteur solaire FS représente le pourcentage d'énergie solaire incidente, transmis au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local. Le choix du facteur solaire influence les économies d'énergie car plus le vitrage contrôle le rayonnement entrant, plus les frais de climatisation et les risques de surchauffe sont réduits. Inversement, le bénéfice des gains solaires en hiver sera diminué.

La transmission énergétique totale, et donc les gains solaires au travers d'un élément transparent, sont fonction de l'angle d'incidence des rayons du soleil avec le vitrage. Les paramètres importants sont par conséquent : la latitude et la saison (pour la position du soleil) ; l'orientation et l'inclinaison de la paroi (pour la géométrie du bâtiment et les propriétés du vitrage utilisé).

La figure 1 montre la diminution rapide du facteur solaire pour des incidences supérieures à 60° indépendamment du type de vitrage utilisé (simple, double ou triple).

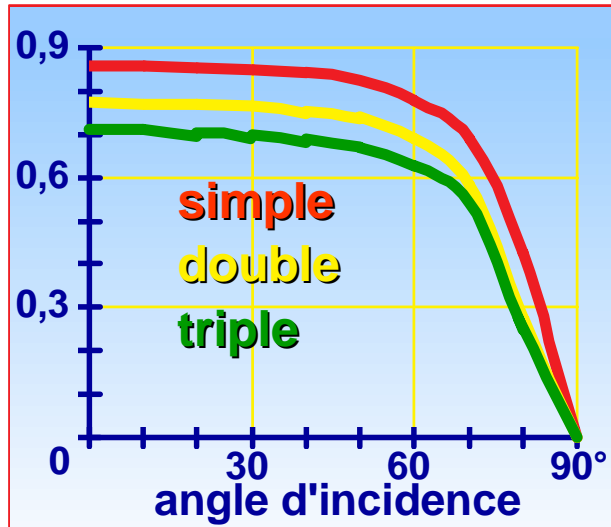
La figure 2 synthétise les caractéristiques du facteur solaire FS pour trois types de verre : vitrages clairs, absorbants, réfléchissants. Les valeurs indiquées ne sont représentatives que d'un angle d'incidence donné. Pour un simple vitrage clair : 84 % de l'énergie incidente sont transmis directement ; 8 % sont réfléchis et 8 % sont absorbés, dont 6 réémis vers l'extérieur et 2 vers l'intérieur. Le facteur solaire correspond à la somme des fractions transmises directement et réémises à l'intérieur, soit 86 %.

- Les vitrages clairs sont connus pour leur haute capacité à laisser pénétrer la lumière. Ils sont fabriqués à partir de silice, de chaux et de soude, mélangées et fondues. Le verre fondu est étalé sur un bain d'étain en fusion. Les deux matériaux ne se mélangent pas et leur surface de contact est parfaitement plane et lisse. Pour un simple vitrage FS = 0,86 (Fig. 2) et pour des doubles vitrages clairs neutres (6 cm - 12 cm - 6 cm), la valeur du facteur solaire varie entre 0,65 et 0,76.

- Les vitrages absorbants sont teintés dans la masse par des oxydes métalliques. Ceux-ci permettent au verre de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire au profit de la fraction absorbée. L'énergie absorbée sera alors réémise sous forme infrarouge des deux côtés du vitrage, suivant un rapport qui dépend de la vitesse du vent et des conditions de température intérieure et extérieure. La réduction réelle de la quantité d'énergie solaire transmise est donc liée à la fraction d'infrarouges réémis vers l'extérieur. L'addition des fractions directement transmises et réémises vers l'intérieur constitue la transmission totale FS. Pour un simple vitrage, on obtient FS = 0,58 (Fig. 2) et pour des doubles vitrages absorbants (6-12-6), la valeur du facteur solaire varie entre 0,46 et 0,67.

- Les vitrages réfléchissants sont caractérisés par la présence d'une très fine couche métallique réfléchissante et transparente, qui accroît la part du rayonnement solaire réfléchi et diminue donc la fraction transmise. Le choix des métaux ou des oxydes détermine la teinte du vitrage : bleu, vert, or, etc.). Ces verres sont utiles pour réduire les gains solaires indésirables, notamment dans les bâtiments de bureaux. Pour un simple vitrage, on obtient FS = 0,49 (Fig. 2) et pour des doubles vitrages réfléchissants (6-12-6), la valeur du facteur solaire varie entre 0,10 et 0,63.

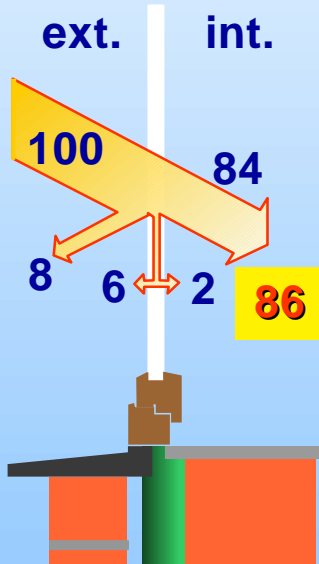
Le facteur solaire FS représente le pourcentage d'énergie solaire incidente, transmis au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local.



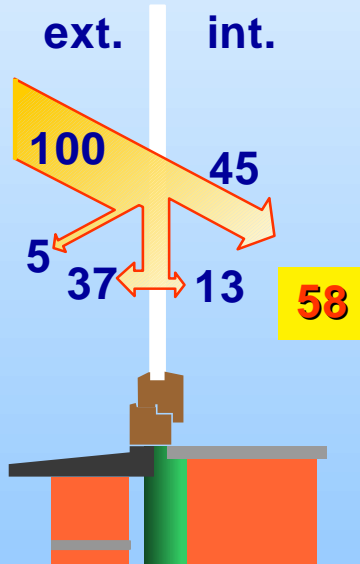
Variation du facteur solaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. **1**

Facteur solaire

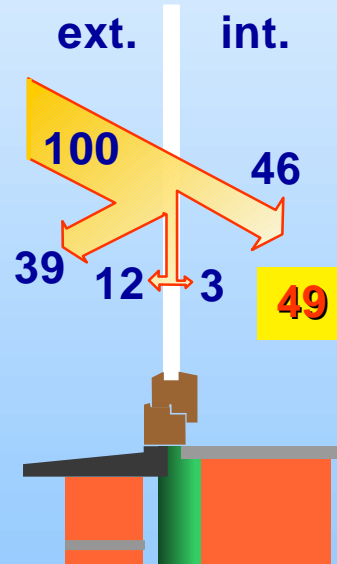
vitrage clair



vitrage absorbant



vitrage réfléchissant



2 Facteurs solaires pour un simple vitrage et pour un angle d'incidence donné.

La transmission lumineuse (TL) correspond au pourcentage de lumière transmis au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local. Par conséquent, plus la TL est élevée, plus grande est la quantité de lumière qui pénètre dans le bâtiment et moins l'éclairage électrique sera nécessaire en journée.

Comme pour le facteur solaire, il est possible de définir la transmission lumineuse pour trois types de vitrages : clairs, absorbants et réfléchissants. La figure 2 synthétise les caractéristiques de transmission lumineuse d'un simple vitrage pour ces trois types de verre. Pour un vitrage clair, 90 % de l'intensité lumineuse sont transmis, alors que 8 % sont réfléchis et 2 % sont dégradés en chaleur au sein du matériau.

- Les vitrages clairs sont connus pour leur haute capacité à laisser pénétrer la lumière.

Simple vitrage clair : $TL = 0,90$ (Fig. 2)
Double vitrage clair (6-12-6) : $0,78 < TL < 0,81$.

- Les vitrages absorbants permettent au verre de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire au profit de la fraction absorbée.

Simple vitrage absorbant : $TL = 0,41$ (Fig. 2)
Double vitrage absorbant (6-12-6) : $0,36 < TL < 0,65$.

- Les vitrages réfléchissants sont caractérisés par un accroissement de la part de rayonnement solaire réfléchi et une diminution de la fraction transmise.

Simple vitrage réfléchissant : $TL = 0,32$ (Fig. 2)
Double vitrage réfléchissant (6-12-6) : $0,07 < TL < 0,66$.

Il ne faut pas perdre de vue que le choix de vitrages réfléchissants risque de modifier l'environnement immédiat d'un bâtiment : éblouissement pour les occupants des bâtiments voisins et pour les passants, surchauffe des sols environnants, voire des bâtiments touchés par les rayonnements réfléchis, etc.

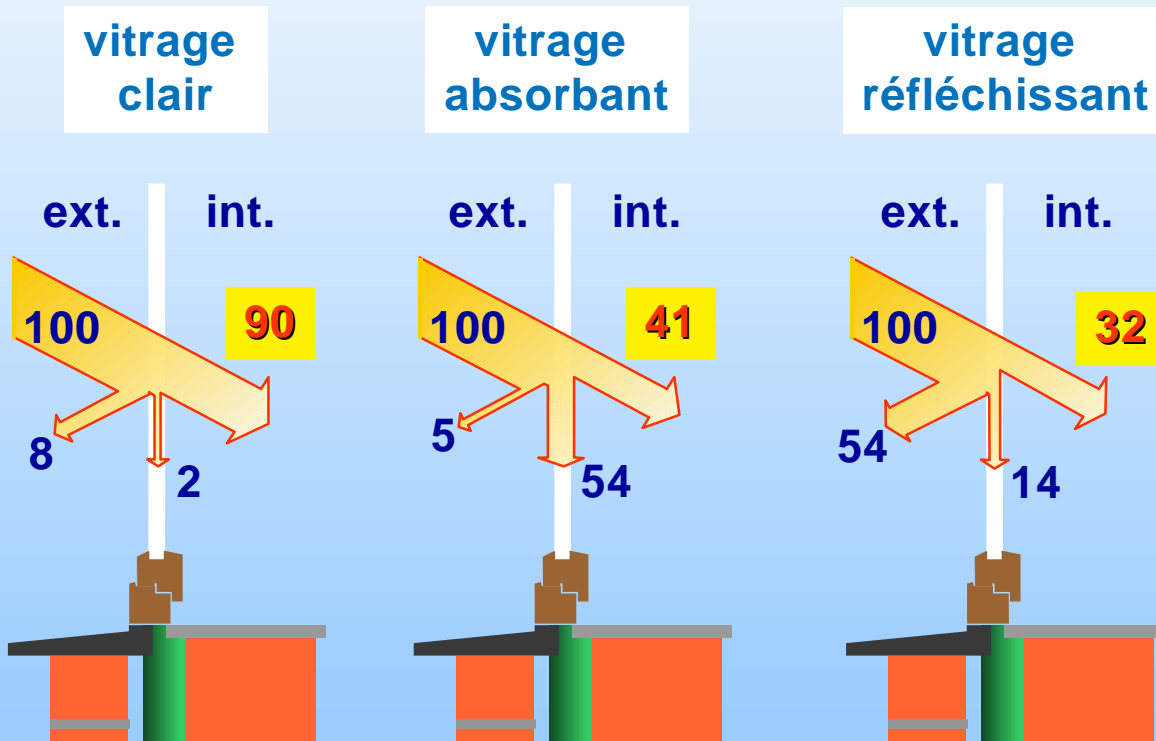
Le choix du facteur TL dépend de la quantité de lumière souhaitée dans le bâtiment. Il faut considérer que l'éclairage naturel disponible varie de manière dynamique sur une échelle très large : de 5 000 lux par ciel couvert à près de 100 000 lux en plein soleil en été, soit un rapport de 1 à 20. Le risque d'éblouissement est d'autant plus important que les conditions de nébulosité varient rapidement. Une transmission lumineuse apparemment basse (0,50) modifie peu les conditions d'éclairage par ciel couvert mais peut contribuer significativement à limiter l'inconfort visuel par ensoleillement direct.

La transmission lumineuse (TL) correspond au pourcentage de lumière transmise au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local.



Le choix du vitrage détermine la quantité de lumière transmise et réfléchie vers l'environnement.

Transmission lumineuse



2 Transmission lumineuse pour un simple vitrage.

Les vitrages représentent les points faibles de l'isolation thermique du bâtiment, mais leurs performances ne cessent de s'améliorer. Grâce aux différents assemblages et traitements aujourd'hui disponibles, les vitrages peuvent mieux jouer leur rôle en assurant une bonne isolation thermique et un bon affaiblissement acoustique et en garantissant la sécurité des biens et des personnes.

Plus le vitrage utilisé est isolant (coefficient K faible), plus les déperditions thermiques à travers sa surface sont réduites en hiver et plus le vitrage est chaud en face intérieure. Il s'ensuit que la température de l'air ambiant doit être moins élevée pour assurer le confort de l'occupant (définition de la température de confort ressentie).

La figure 2 présente les coefficients de déperdition thermique K pour des vitrages clairs : simple vitrage, double vitrage et double vitrage à basse émissivité ainsi que les proportions d'énergie réfléchie, transmise et absorbée permettant le calcul du facteur solaire (FS).

Différents moyens ont été mis en œuvre pour réduire la transmission thermique au droit des vitrages. Le premier a été de diminuer les pertes par conduction en intercalant entre deux vitrages un excellent isolant, transparent, disponible et gratuit : l'air immobile sec. L'air présente, en effet, une grande résistance thermique pour autant que les mouvements de convection soient empêchés. La capacité d'isolation de ces vitrages dépend de l'épaisseur de la lame d'air : plus celle-ci sera épaisse, plus le vitrage sera isolant (au-delà de 20 mm, des courants de convection apparaissent et le gain d'isolation disparaît). Les valeurs K de ces vitrages sont comprises entre 2,76 et 3,59.

Sur le même principe, on a conçu les triples vitrages. Les valeurs K sont alors comprises entre 1,90 et 2,61.

Une autre voie consiste à agir sur les caractéristiques de surface du verre. Le vitrage à basse émissivité est recouvert d'une mince couche d'oxyde métallique parfaitement transparent, qui permet de réduire considérablement l'émission des infrarouges vers l'extérieur. Les vitrages peuvent disposer d'une ou de deux couches à basse émissivité, mais on peut également remplacer la couche d'air par un gaz rare (argon, krypton) dont la conductivité thermique est plus faible que l'air. Ces gaz sont non toxiques et ininflammables. Les valeurs K de ces vitrages sont comprises entre 1,13 et 2,40.

De nombreux matériaux expérimentaux permettent aujourd'hui d'atteindre des valeurs K comprises entre 0,3 et 0,7, comparables à celles des parois isolées. Citons pour mémoire les "superfenêtres" (triple couche, basse émissivité, gaz rare), les "vacuum windows" (vide maintenu entre les deux vitrages), les fenêtres à aérogel (mousse microporeuse transparente et isolante), les "smart windows". Ces dernières consistent en un film de cristaux liquides, intercalé dans le vitrage. Un champ électrique suffit à orienter les cristaux pour que le vitrage devienne transparent (Fig. 1).

Les vitrages représentent les points faibles de l'isolation thermique du bâtiment, mais leurs performances ne cessent de s'améliorer.



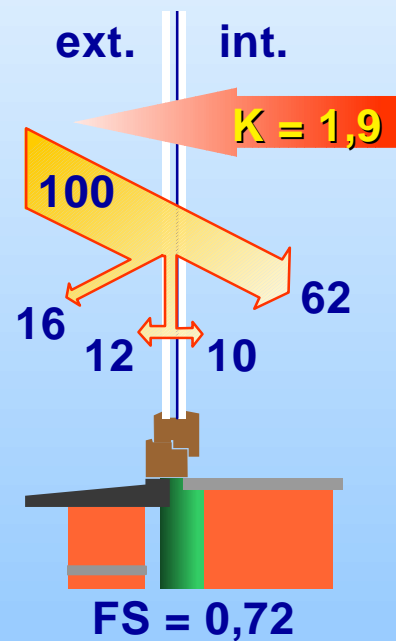
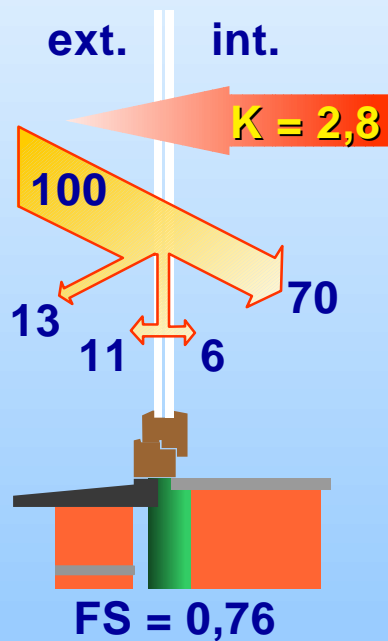
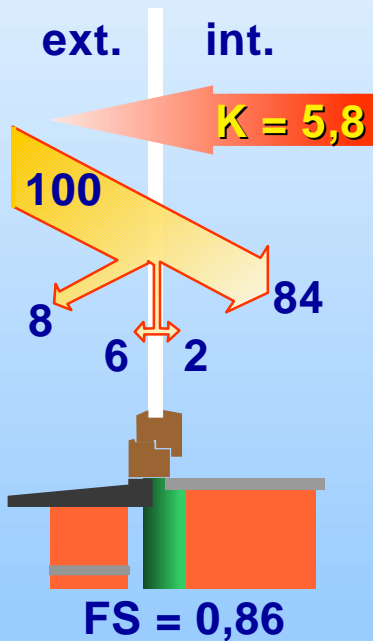
Smart windows : un film de cristaux liquides est intercalé dans le vitrage. 1

Coefficient K (W/m².K)

simple vitrage clair

double vitrage clair

double vitrage basse émissivité



2 Performance thermique et type de vitrage.

L'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage. Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante.

La figure 1 présente des simulations des besoins en chauffage d'un petit logement et compare plusieurs inerties et vitrages exposés au sud :

- sv-im : simple vitrage et inertie moyenne ;
- dv-fi : double vitrage et faible inertie ;
- dv-im : double vitrage et inertie moyenne.

On constate que la réduction des besoins en énergie grâce aux apports solaires repose sur le travail combiné de l'effet de serre des vitrages (piège à chaleur) et de l'inertie (stockage). Le stockage direct est un processus par lequel le rayonnement solaire, irradiant un matériau, est partiellement absorbé par celui-ci, transformé en chaleur et accumulé en son sein. La capacité d'accumulation d'un matériau dépend de sa chaleur spécifique, de sa conductivité thermique et de son poids volumique. Une paroi peut aussi s'échauffer en absorbant la chaleur rayonnée par d'autres parois ayant une température supérieure. De même, si l'air est plus chaud que la paroi, celle-ci peut gagner des calories par convection. Ce type de stockage est alors indirect.

Les calories peuvent également être accumulées dans une masse par l'intermédiaire d'un organe mécanique, comme une serre alimentant un stockage de galets. Ce type de stockage vise une utilisation différée des calories et demande un système d'extraction de la chaleur.

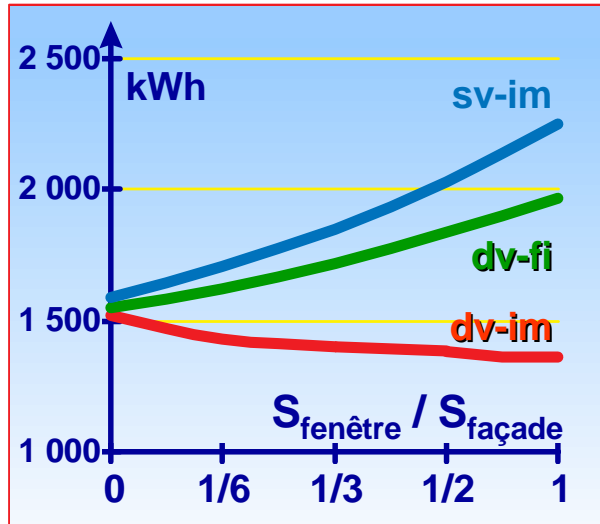
La figure 2 compare la réponse d'un bâtiment à forte inertie (masse surfacique des parois $> 400 \text{ kg/m}^2$) à celle d'un bâtiment à faible inertie (masse surfacique $< 150 \text{ kg/m}^2$) en présence d'un apport de chaleur par rayonnement solaire. La surface jaune S1 représente l'évolution dans le temps de l'offre solaire. La surface S2 représente la réponse du local à faible inertie et la surface S3, celle du local à forte inertie.

Au temps t_1 , le rayonnement solaire est intense : la chaleur restituée par le local à faible inertie est importante alors que celle restituée par le local à forte inertie est réduite.

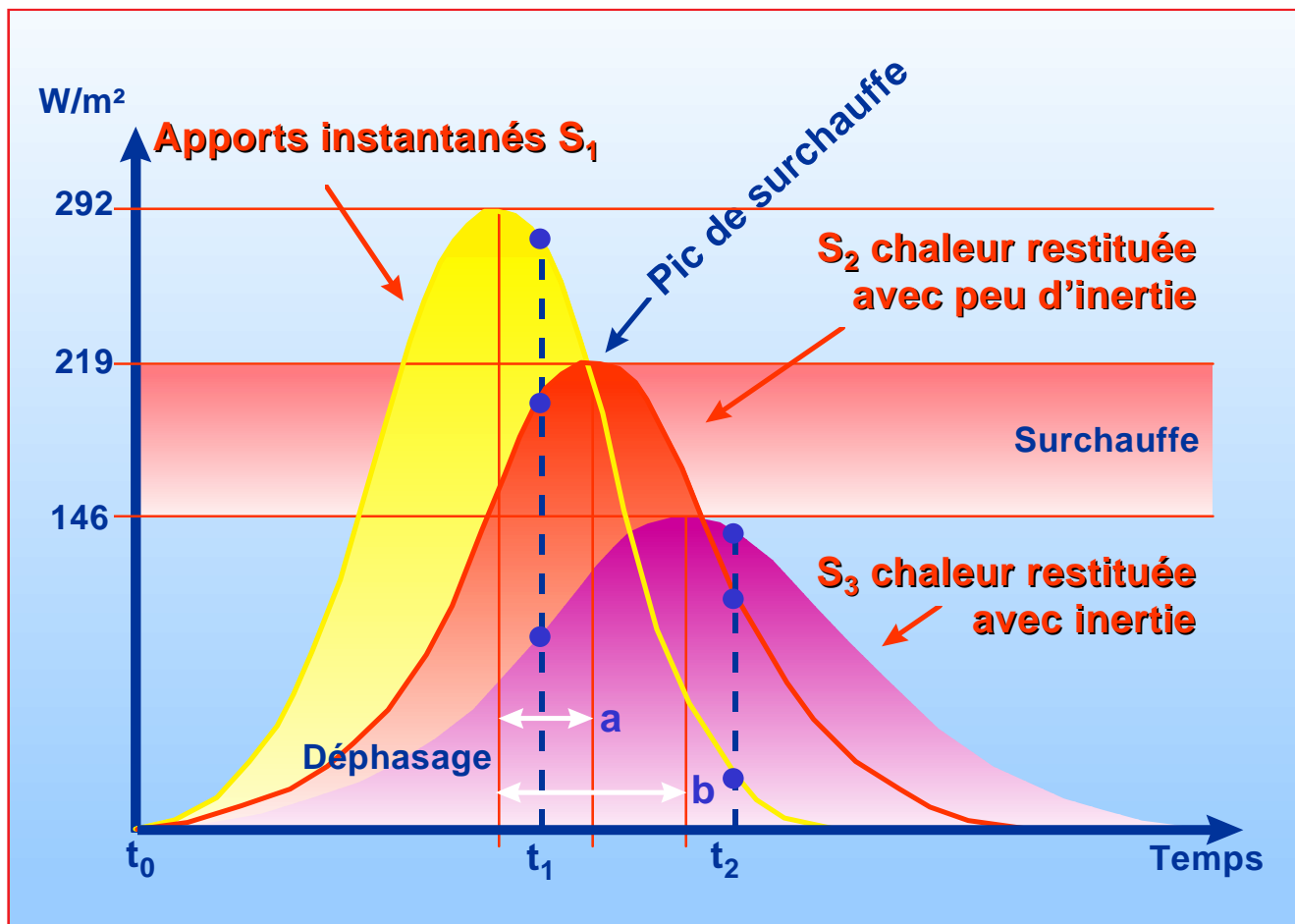
Au temps t_2 , le rayonnement solaire est faible : la chaleur restituée par le local à faible inertie est faible (les réserves de chaleur sont épuisées) tandis que la chaleur restituée par le local à forte inertie est importante (les réserves de chaleur sont élevées).

L'incapacité d'un local, à faible inertie, de stocker la chaleur provoque des phases de surchauffe assez rapides en cas d'ensoleillement intense car le temps de déphasage (a) est très court. Inversement, le local à forte inertie pourra accumuler la chaleur (limitation de la surchauffe) et la restituer après un temps de déphasage (b) de plusieurs heures ($b > a$). Une capacité thermique très élevée (architecture troglodytique) peut induire un déphasage de plusieurs mois.

L'inertie d'un bâtiment mesure sa capacité à stocker la chaleur, à en différer la restitution et à atténuer l'effet des surchauffes dues aux apports solaires.



Variation des besoins en énergie en fonction des vitrages et de l'inertie. 1



2 Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inertie faible en présence d'apports solaires.

Le stockage de la chaleur peut être direct ou indirect.

- Stockage direct :

Toute masse directement frappée par le rayonnement solaire ou après le passage au travers d'un élément vitré, stocke quasi instantanément une partie de ce rayonnement. Ce phénomène permet d'étaler dans le temps les effets de captage du rayonnement solaire et d'éviter de rapides surchauffes. La quantité de chaleur stockée par un matériau dépend d'une part de sa capacité à transmettre une variation de température ("diffusivité"), qui est sensiblement du même ordre de grandeur pour tous les matériaux de construction (de 1 à 4), et, d'autre part, de sa capacité à absorber ou restituer une puissance thermique ("effusivité"). L'effusivité dépend de la conductibilité thermique, de la masse volumique et de la chaleur spécifique. Du point de vue de leur effusivité, les matériaux de construction sont très différents (de 1 à 100). L'efficacité d'un stockage dépend donc de la quantité de chaleur emmagasinable par ces matériaux. Les maçonneries et le béton offrent une bonne capacité de stockage (111 Wh/m².K pour une épaisseur de 15 cm). L'eau, offrant une grande capacité thermique, a souvent été utilisée dans les années 70 comme réservoir de chaleur (murs de bidons d'eau en façade sud).

- Stockage indirect :

Sous cette appellation, on retrouve deux types de stockage distincts.

Le premier s'effectue naturellement par échange de chaleur par convection et par rayonnement. Cet échange de calories entre masses de températures différentes est spontané car il obéit au second principe de la thermodynamique visant à l'équilibre thermique entre les masses. Ce phénomène permet une accumulation de chaleur supplémentaire à celle procurée par les mécanismes de stockage direct. Ce sont tous les deux des mécanismes solaires passifs qui offrent une réserve de chaleur d'un à deux jours.

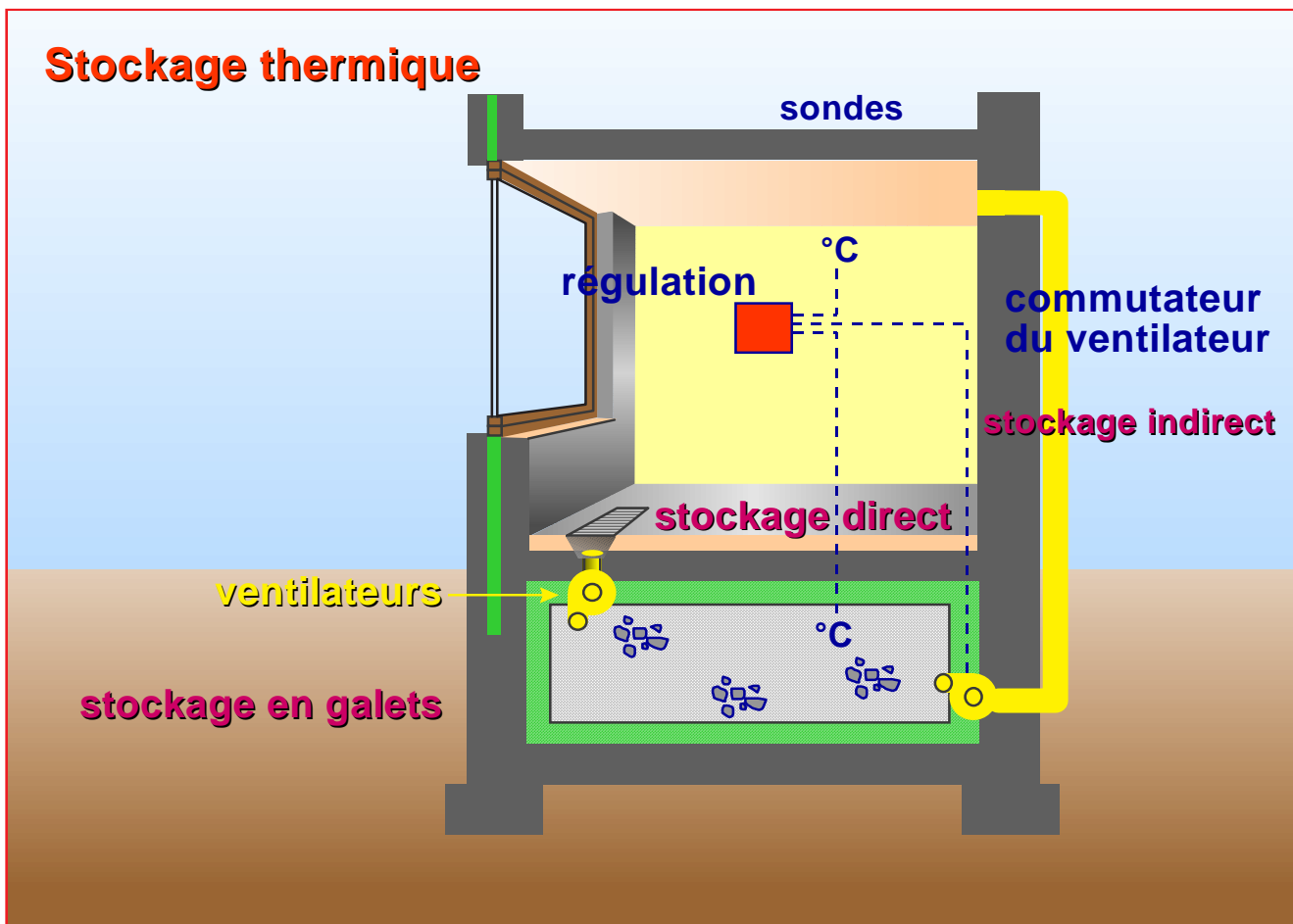
Le second stockage indirect est mis en place volontairement dans le cadre des systèmes solaires hybrides et actifs parce qu'il fait appel à une masse accumulatrice ainsi qu'à un mode de transport de la chaleur (ventilateur et gaines de pulsion s'il s'agit d'air ; pompe et tuyaux si la chaleur est véhiculée par un liquide) (Fig. 2). Ce mode de stockage vise à équilibrer la disponibilité des calories. En effet, les variations d'ensoleillement sont liées aux rythmes journaliers et saisonniers. Elles déterminent donc des périodes durant lesquelles les apports peuvent être excessifs et d'autres où la demande n'est pas satisfaite. Dès lors, le principe du stockage est d'accumuler les excès de chaleur pour les redistribuer en temps voulu. Le volume du stockage est déterminé en fonction de sa nature (galets, bloc, etc.), du mode de transport de chaleur (air ou eau) et de la surface de captage. Dans un système solaire actif, le stockage peut se faire sous forme de chaleur sensible (échange de chaleur entre le fluide et la matière du réservoir, le plus souvent de l'eau ou des galets) ; il peut aussi se faire par changement de phase (la chaleur absorbée fait passer le matériau accumulateur d'une phase à l'autre) ou par mode chimique (un élément est décomposé sous l'effet de l'apport de chaleur puis stocké pour être réutilisé dans le sens inverse et produire de la chaleur par recombinaison exothermique).

La figure 1 montre la maquette éclatée d'une maison basse énergie à Berlin. Un double réservoir central, de 19 m³, stocke la chaleur provenant des capteurs solaires. Les déperditions thermiques du réservoir central permettent de réchauffer l'ambiance intérieure.

Le principe du stockage thermique est d'accumuler les excédents de chaleur pour redistribuer celle-ci quand l'offre solaire vient à manquer.



Maquette d'une maison basse énergie à Berlin. Un double réservoir central stocke la chaleur provenant des capteurs solaires.



2 Mécanismes de stockage thermique.

Une installation de chauffage est toujours dimensionnée pour vaincre les périodes de froid extrême. Pendant le restant de la période de chauffe, c'est le système de régulation qui a pour fonction d'ajuster la puissance émise, quelles que soient les perturbations internes (occupation, activités) ou externes (climat) au bâtiment. Une inadéquation entre la demande et l'offre de chaleur peut être à l'origine d'une insuffisance de chaleur et d'un inconfort.

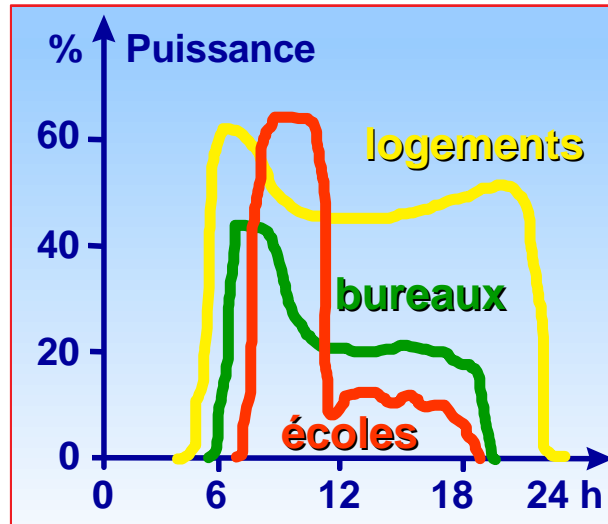
Le chauffage peut être piloté par une programmation (type jour ou nuit, etc.) qui détermine les températures de consigne désirées pour un horaire déterminé. Par exemple : relance du chauffage à 6 h 30 jusqu'à une température de 20 °C, maintien pendant la journée à 18 °C, puis relance vers 17 h 00 et maintien, à 16 °C, la nuit. Ce schéma de fonctionnement est directement lié au schéma d'occupation du bâtiment.

La figure 1 compare les profils de chauffage de trois types de bâtiments très différents : logements, écoles et bureaux. L'axe vertical représente la puissance de chauffage (en % de la puissance maximale) et l'axe horizontal représente une journée. On constate que les logements ont des besoins de chauffage plus importants que les autres types de bâtiments. A l'inverse, les écoles ne doivent pratiquement chauffer que le matin puisqu'elles bénéficient d'apports internes importants, principalement dus au dégagement de chaleur métabolique des élèves. Les bureaux ont le même profil de chauffage que les écoles, mais plus étalé dans le temps. Les gains internes sont également importants, provenant essentiellement des équipements. Les courbes correspondent à une température extérieure de + 4 °C, par ciel couvert un jour d'hiver.

Le maintien de la température de confort, à l'intérieur d'un bâtiment occupé, dépend des conditions de température extérieure. En régime stationnaire, le système de chauffage fournit une chaleur dont une partie est perdue vers l'extérieur par conduction à travers l'enveloppe ou par réchauffement de l'air frais. Ces déperditions sont proportionnelles au niveau d'isolation du bâtiment, mais aussi à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. C'est pourquoi il est intéressant de déterminer la température de départ du fluide caloporteur du système de chauffage en fonction des conditions de température extérieure. Pour cela, une sonde de température est placée à l'extérieur du bâtiment (Fig. 2).

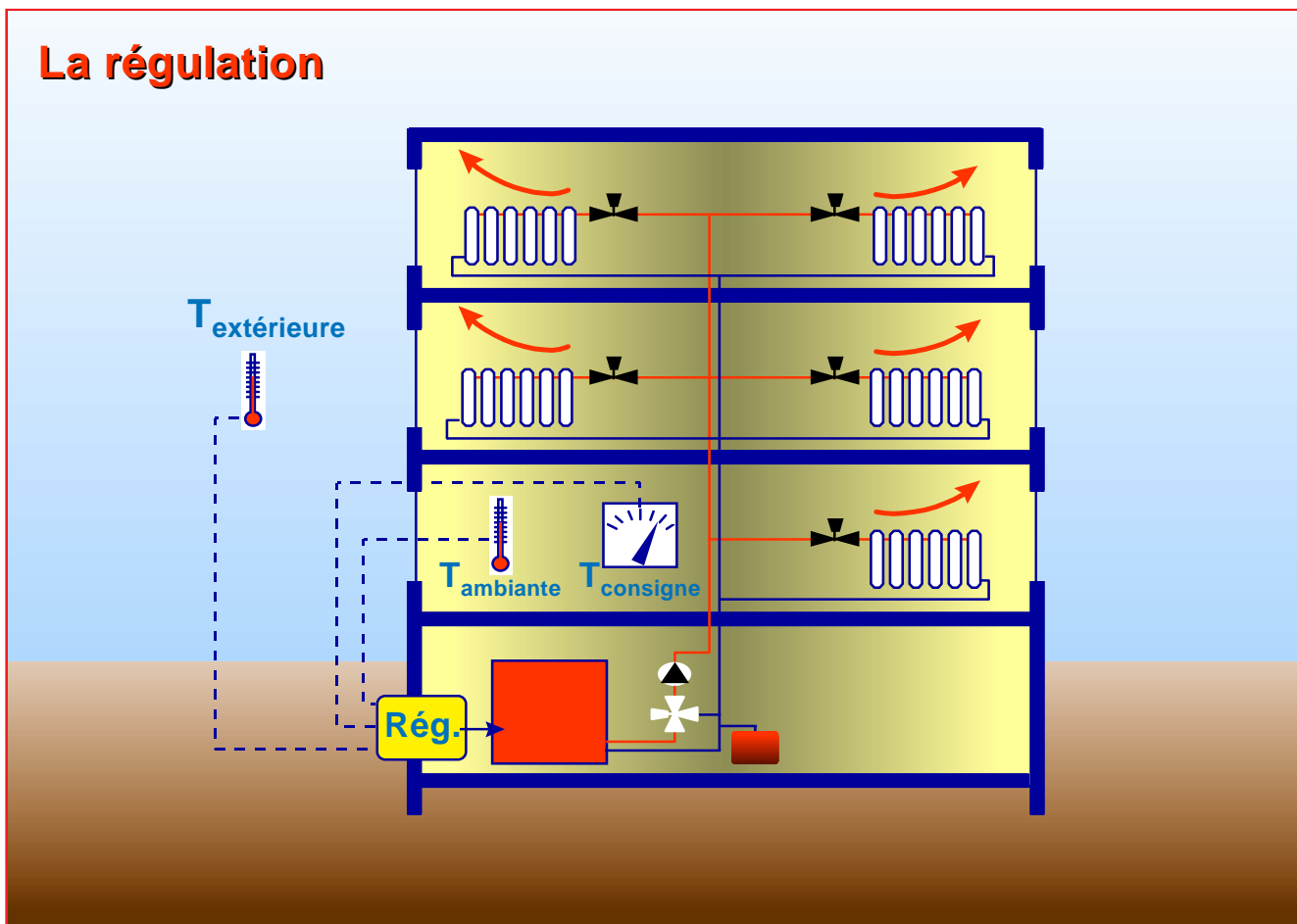
La programmation ne peut tenir compte des conditions locales auxquelles peut être soumis l'occupant : apports internes importants, rayonnement solaire intense, etc. Aussi est-il nécessaire de réguler localement la distribution de la chaleur. Par exemple, un thermostat d'ambiance peut à tout moment déterminer la température intérieure dans la pièce et lancer ou couper le chauffage. Enfin, pour compléter l'installation, les radiateurs peuvent être équipés de vannes thermostatiques. Il s'agit de robinets dont le pointeau est actionné par un bulbe sensible à la température de l'air ambiant. La vanne s'ouvre ou se ferme en réaction à la température ambiante locale.

La régulation du chauffage vise à faire correspondre l'offre de chaleur à la demande précise de l'occupant : quelle température, où et quand ?



Evolution de la demande de chauffage au cours de la journée. 1

La régulation



2 Schéma de fonctionnement d'un système de chauffage avec sonde extérieure, thermostat d'ambiance et vannes thermostatiques.

La climatisation regroupe l'ensemble des techniques visant à créer et maintenir des conditions déterminées de température et d'humidité relative, et éventuellement de pureté de l'air, en toute indépendance du climat et de ses fluctuations.

La climatisation, par opposition aux chauffages conventionnels, peut répondre tant au froid (production de chaleur ou de calories) qu'à la surchauffe (production de froid ou de frigories). C'est aux Etats-Unis que son emploi, dans le tertiaire comme dans le résidentiel, s'est généralisé : le mode de construction légère (en bois) ne permettant pas de répondre confortablement à la grande fluctuation de températures que connaît le continent nord-américain.

La climatisation apporte donc une correction en "temps réel" aux problèmes de confort, même si la consommation énergétique spécifique des systèmes de climatisation est importante et constitue un des secteurs de consommation d'énergie en pleine croissance, dans certaines régions comme le sud de l'Europe.

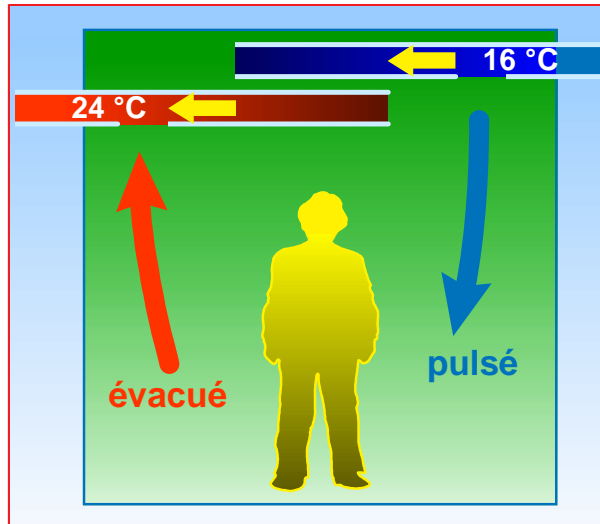
L'architecture bioclimatique considère qu'une conception adéquate de l'habitat doit d'abord viser à éviter les situations d'inconfort (surchauffe, humidité excessive, etc.) par des moyens naturels avant d'envisager d'installer une technologie de correction mécanique et énergivore. Il faut reconnaître cependant que le confort est extrêmement difficile à assurer sous certaines conditions climatiques (principalement en climat chaud et humide) sans l'aide de la climatisation.

La climatisation repose sur le principe du double flux : un flux d'air entrant (propre, frais) remplace un flux d'air sortant (vicié, chaud) (Fig. 1). Le circuit d'air étant fermé, il est impératif de pouvoir contrôler les entrées d'air parasites. C'est pourquoi il est généralement impossible d'ouvrir les fenêtres dans un bâtiment équipé de la climatisation : l'ouverture d'une baie bouleverserait l'équilibre des masses d'air et dérèglerait l'installation.

Les installations de climatisation gèrent plusieurs quantités intervenant dans la notion de confort : température de l'air, humidité relative de l'air, débit d'air et éventuellement pureté de l'air (filtres et sondes de contrôle). Le problème auquel doivent faire face les installations de climatisation repose généralement sur l'évacuation des calories (provenant surtout des apports internes) puisqu'il faut baisser la température de l'air pulsé tout en évitant les coups de froid, et gérer les débits en évitant les courants d'air.

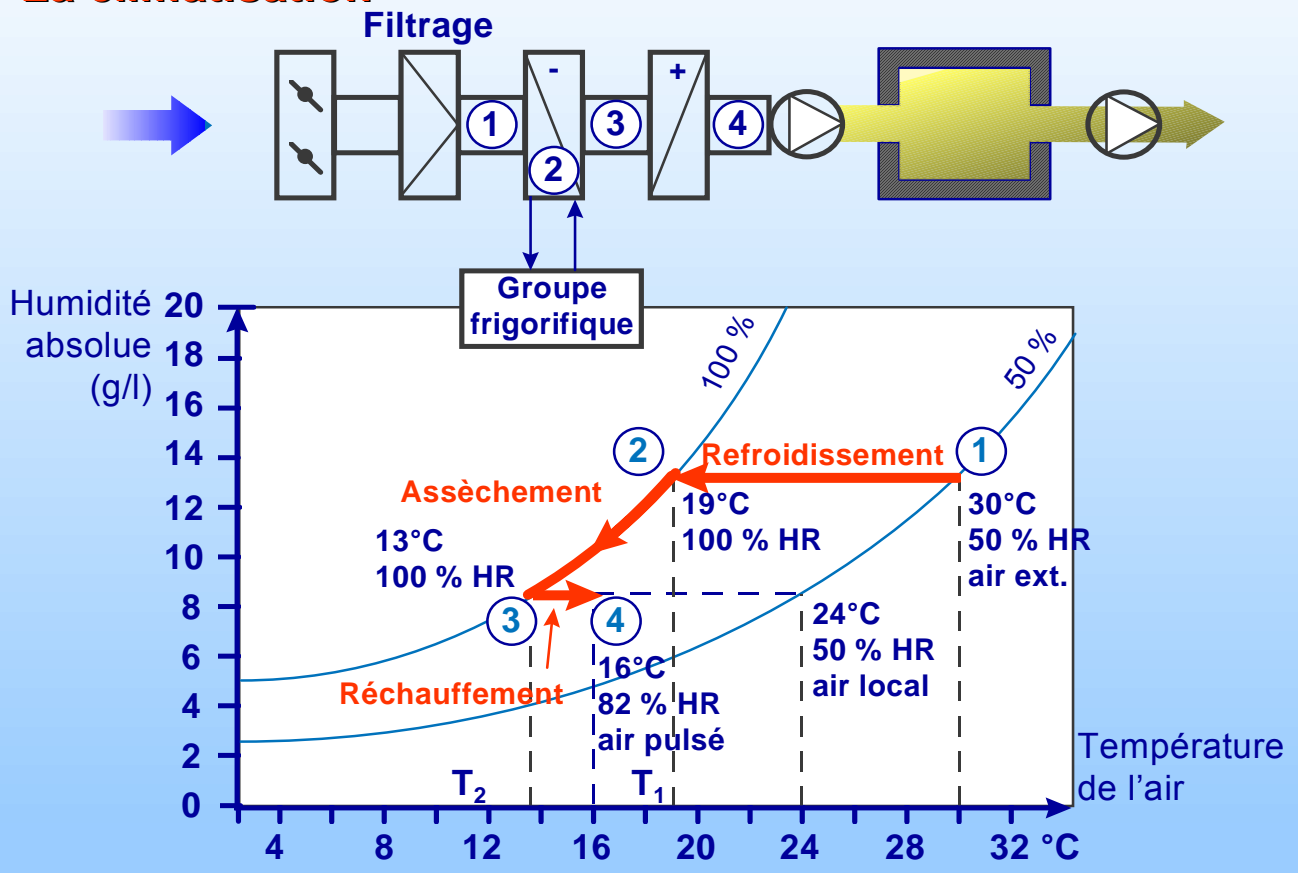
La figure 2 illustre le fonctionnement d'été d'une installation de climatisation. Aussi longtemps que l'air extérieur (1) passant dans le refroidisseur reste au-dessus de sa température de point de rosée (T_1), sa température diminue tout en conservant une quantité d'eau par m^3 d'air constante (2). Puis, par refroidissement en dessous de T_1 , une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air condense à la surface du refroidisseur : l'air est asséché et refroidi en suivant la courbe de saturation et arrive en (3), température minimale correspondante à la température de rosée de l'air du local T_2 . Cet air est ensuite réchauffé jusqu'à atteindre une température de pulsion (4) acceptable pour le confort des occupants.

La climatisation est un procédé de régulation du confort à double flux (air entrant - air sortant) fonctionnant indépendamment du climat. Ces systèmes sont, par ailleurs, énergivores.



Principe du double flux. 1

La climatisation



2 Fonctionnement d'été d'une installation de climatisation.

Le livre blanc "Sources d'énergies renouvelables : énergie pour l'avenir", adopté par la Commission européenne fin 1997, fixe la part des sources des énergies renouvelables dans la consommation intérieure de l'Union européenne à 12 % en 2010. Le programme "Énergie intelligente Europe" (EIE) de la direction générale Énergie et Transport de la Commission européenne constitue le principal instrument de soutien de la politique communautaire en matière de promotion des sources d'énergies renouvelables.

Au sein des 25 pays de la Commission européenne, 6 % de la consommation d'énergie primaire provient de ces énergies renouvelables. En France, pour 2003, cette part était également de l'ordre de 6 %, soit 15,5 Mtep (fig. 1). L'hydroélectricité y contribue pour environ un tiers (5 Mtep), mais la majeure partie provient de la biomasse (9,9 Mtep). Les autres filières (géothermie, solaire et éolien) ne représentent que 0,47 Mtep.

Le solaire thermique, le solaire photovoltaïque, l'éolien, la géothermie, la micro-hydroélectricité (centrale de puissance inférieure à 10 MW) et la filière bois-énergie sont les principales filières des énergies renouvelables. Une plus grande utilisation de ces énergies signifierait, à la fois, la réduction de la vitesse d'épuisement des ressources en énergies fossiles et une meilleure protection de l'environnement grâce, entre autres, à la réduction des rejets de combustion.

Parmi les énergies renouvelables, certaines sont particulièrement aptes à être utilisées dans le logement :

- Le solaire thermique couvre un double champ : le chauffage des bâtiments et le chauffage de l'eau sanitaire. Des dispositifs contractuels tels que la Garantie de résultats solaires (GRS) et l'amélioration de la qualité des matériels ont été mis en place pour favoriser la diffusion du solaire thermique. La technologie du chauffage solaire s'est aussi orientée vers des systèmes moins onéreux qu'auparavant, comme les systèmes combinés qui connaissent un fort développement depuis quelques années.

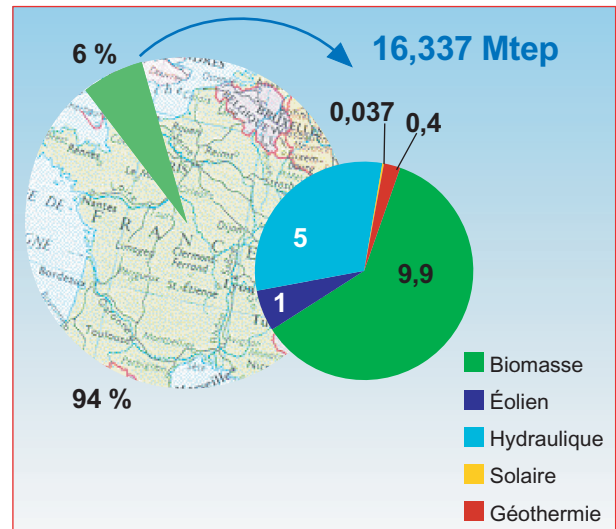
- Le solaire photovoltaïque convertit la lumière solaire en électricité par l'intermédiaire de cellules photovoltaïques. Son utilisation concerne les "oubliés du réseau" qui, parce qu'ils sont géographiquement isolés, ne sont pas raccordés au réseau national de distribution d'électricité, mais également les bâtiments en milieu urbain qui souhaitent intégrer cette énergie respectueuse de l'environnement.

- La géothermie, utilisée à des fins de chauffage des bâtiments ou de production d'électricité a connu un grand développement dans les années 1980. Actuellement, en France, 205 000 logements sont chauffés de cette manière, économisant ainsi 340 000 tep/an.

L'intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments influence la conception de ces derniers dans ce que l'architecture a de plus fondamental : l'orientation, le mode d'ouverture, les matériaux, etc. L'architecture bioclimatique se nourrit précisément de ces "contraintes" pour produire un habitat intégrant la notion de confort, de bien-être et d'économie. Le choix d'intégrer des énergies renouvelables implique davantage que l'utilisation de technologies nouvelles dans un bâtiment. Il s'agit plutôt d'une approche globale de conception du cadre de vie qui rapproche les habitants des phénomènes naturels, qu'ils soient climatiques ou écologiques, et permette, en réduisant les nuisances des uns et des autres, de mieux vivre ensemble.

La figure 2 montre un quartier construit en 1994. La conception intègre l'utilisation des énergies renouvelables (solaire passif, capteurs thermiques, récupération de l'eau de pluie) mais également l'emploi de matériaux écologiques (terre cuite en mur et en dalle, y compris pour la toiture, isolants de type isofloc, plafonnage sur jonc, bois indigènes, etc.).

Les énergies renouvelables représentent, aujourd'hui, 6 % de la consommation d'énergie primaire en Europe.



1 Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique française et leur répartition (en Mtep).



2 Cité écologique "Geroldsacker", à Karlsruhe, Allemagne (arch. Löffler & Schneider).

La ville de Rennes, désireuse d'expérimenter les énergies renouvelables, a choisi une crèche pour sa première réalisation solaire. Un choix judicieux, car la plupart de ces établissements pour enfants sont dotés, pour des raisons de confort thermique, d'un chauffage basse température par le sol, particulièrement bien adapté à une alimentation solaire.

La crèche de la Poterie comprend 4 unités de 16 enfants, pour une surface au sol de 900 m² et un volume de 2 500 m³. Elle est constituée d'un volume principal en forme de crosse qui regroupe l'ensemble des lieux de vie. Un volume perpendiculaire comprend les services. La longue façade courbe du bâtiment se déploie au sud et accueille sur son faite 92 m² de capteurs solaires thermiques.

Fixés sur le toit-terrasse et inclinés à 45°, les capteurs font office de pare-soleil aux baies situées à l'aplomb. L'eau qui y circule monte en température entre 25 et 75 °C et alimente le plancher chauffant et le ballon d'eau chaude sanitaire de la crèche.

Celle-ci est implantée dans un quartier récent équipé d'un réseau de chauffage central collectif, qui a été choisi comme appoint au solaire. Le réseau assure une distribution de l'eau chaude à 55 °C et alimente les radiateurs qui complètent le chauffage par le sol. Les jours ensoleillés, ainsi que durant les week-ends et les congés scolaires, les calories solaires en excès par rapport à la consommation de la crèche sont envoyées sur le réseau qui dessert 40 logements HLM voisins, pour le préchauffage de l'eau sanitaire. Les capteurs sont ainsi utilisés en continu et l'énergie solaire n'est jamais gaspillée.

Le taux de couverture solaire pour le chauffage avoisine aujourd'hui 40 % (32 000 kWh/an), ce qui représente une économie annuelle de 1 200 €, environ. L'eau chaude sanitaire est produite à 100 % par l'installation solaire, du mois de mai au mois de septembre.

En 2004, dans l'Union européenne, ce sont plus de 1 693 000 m² de capteurs solaires thermiques qui ont été installés, et le marché est en plein essor avec plus de 10 % de croissance par rapport à 2003. L'Allemagne reste le premier marché de l'Union européenne avec 46,1 % de part de marché, devant la Grèce (12,7 %), l'Autriche (11,3 %) et la France (6,9 %).

Les 92 m² de capteurs solaires thermiques couvrent la quasi-totalité des besoins en eau chaude sanitaire et 40 % des besoins de chauffage de cette crèche située à Rennes.



Inclinés à 45°, les capteurs servent également de pare-soleil à la façade sud (arch. B. Pierre).

1



Capteurs solaires

2 L'eau chaude sanitaire, produite grâce aux capteurs solaires, bénéficie à la crèche et aux logements HLM (à droite).

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon est le système à conversion directe du rayonnement solaire en chaleur le plus répandu.

Malgré la présence de capteurs, il s'agit d'un système passif car il n'a besoin d'aucune énergie supplémentaire (pompe) pour fonctionner. En effet, par temps ensoleillé, le liquide caloporteur se met en mouvement sous l'effet de la différence de densité entre les masses d'eau.

Le chauffe-eau solaire est composé des éléments suivants (Fig. 2):

- Le capteur solaire qui transforme le rayonnement solaire en chaleur.

- Un accumulateur de chaleur sous forme de réservoir d'eau chaude, isolé. Ce stock permet d'accumuler la chaleur, de manière à répondre au mieux aux variations de la demande et des apports solaires.

- Le circuit de transfert de la chaleur qui relie par deux conduites principales le capteur au réservoir d'eau.

- Le fluide caloporteur constitué, en général, par de l'eau glycolée pour éviter le risque de gel. L'échange de chaleur se fait au sein du réservoir via un serpentín, permettant de garder l'eau du réseau séparée de l'eau du circuit et éviter tout risque de contamination.

- Eventuellement, une résistance électrique (ou une autre source de chaleur) permettant de suppléer à l'insuffisance d'apports solaires ou de répondre à une demande de chaleur trop importante.

Pour pouvoir se passer de la pompe de circulation caractéristique des chauffe-eau solaires actifs, il importe de respecter certaines prescriptions d'installation des capteurs par rapport au ballon d'eau chaude. Les conduites aller et retour ne doivent pas excéder quelques mètres afin de minimiser les pertes de charge et la distance minimum entre le haut des capteurs et le bas de l'accumulateur doit être comprise entre 30 et 80 cm.

On peut approximativement compter 1 m² de capteur pour 50 litres de consommation journalière moyenne ou 1 m² de capteur par personne. Le volume de stockage doit être compris entre 70 et 100 litres par m² de capteur.

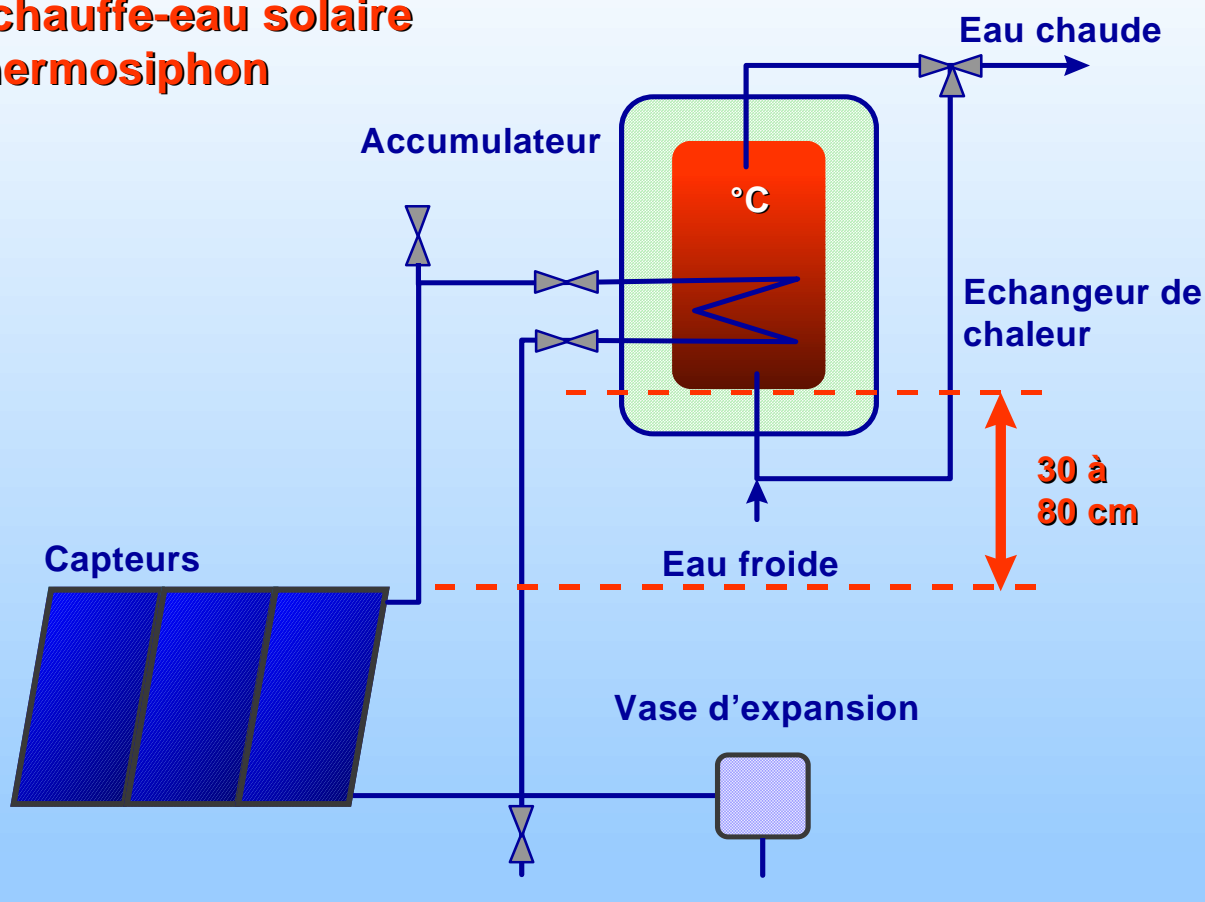
Les capteurs solaires doivent être installés dans un lieu bénéficiant du soleil toute la journée ; généralement, en toiture. Quant au ballon d'eau, il est souvent placé à l'intérieur de l'habitat pour éviter des déperditions de chaleur trop importantes.

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon utilise des capteurs pour réchauffer l'eau sanitaire et profite de la différence de densité entre masse d'eau chaude et masse d'eau froide pour la faire circuler.



L'eau chaude est produite par les quelques m² de capteurs intégrés à la toiture de cette maison (Stiebel Eltron).

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon



2 Schéma de fonctionnement du chauffe-eau solaire à thermosiphon.

La technique du plancher solaire direct (PSD®) est récente mais elle est déjà bien établie, en particulier dans le sud de la France.

Le PSD® est issu de travaux menés par l'École supérieure d'ingénieurs de Marseille. Il associe des capteurs thermiques à un chauffage dans le sol, par serpentins, sans nécessité d'un réservoir de stockage spécifique, ce qui s'avère plus économique. Le fluide est chauffé par les capteurs solaires et circule directement dans le plancher; la masse de béton formant la dalle de sol assure elle-même le stockage de l'énergie, et le jeu du déphasage permet à la chaleur d'être rendue à l'ambiance intérieure.

On distingue aujourd'hui :

- Les PSD® simples pour lesquels les appoints en chauffage sont des émetteurs distincts (poêles, cheminées, convecteurs, etc.).

- Les PSD® à appoint intégré pour lesquels on connecte une seconde source de production de chaleur (gaz, fioul, etc.), émettant également par le plancher. L'énergie d'appoint est donc distribuée par le même réseau : le plancher chauffant.

Dans la technique du PSD®, toutes les pertes d'échange ou de stockage de la chaleur sont éliminées, et les capteurs travaillent à un meilleur rendement, car ils sont raccordés à une distribution directe à basse température. Le rayonnement solaire permet également de préchauffer l'eau chaude sanitaire en mi-saison et de la chauffer complètement en été.

La productivité des capteurs atteint environ 400 à 550 kWh/m² par an dans la région Rhône-Alpes, caractérisée par une période de chauffe assez longue, un ensoleillement généreux et des saisons nettement différenciées.

La maison Letz (fig. 1) se caractérise par un plancher solaire direct à appoint intégré et une petite serre. Les pièces à vivre sont bien orientées au sud. La serre, placée en prolongation des panneaux solaires permet de préchauffer l'air neuf nécessaire à l'aération de la maison. L'air est ensuite dispersé dans les autres pièces par une ventilation mécanique contrôlée (VMC).

La technique du PSD® à appoint intégré est mise en œuvre au rez-de-chaussée comme à l'étage. L'épaisseur de la dalle contenant le circuit d'eau chaude est réduite à 12 cm au lieu des 30 cm traditionnellement nécessaires (fig. 2). À l'étage, la dalle contenant le réseau de distribution d'eau chaude est réalisée sur un tapis de laine minérale de 3 cm d'épaisseur, ce qui limite les déperditions vers le bas et assure un confort acoustique accru. En été, lorsque le chauffage ne fonctionne pas, les capteurs assurent également la production d'eau chaude pour deux maisons mitoyennes.

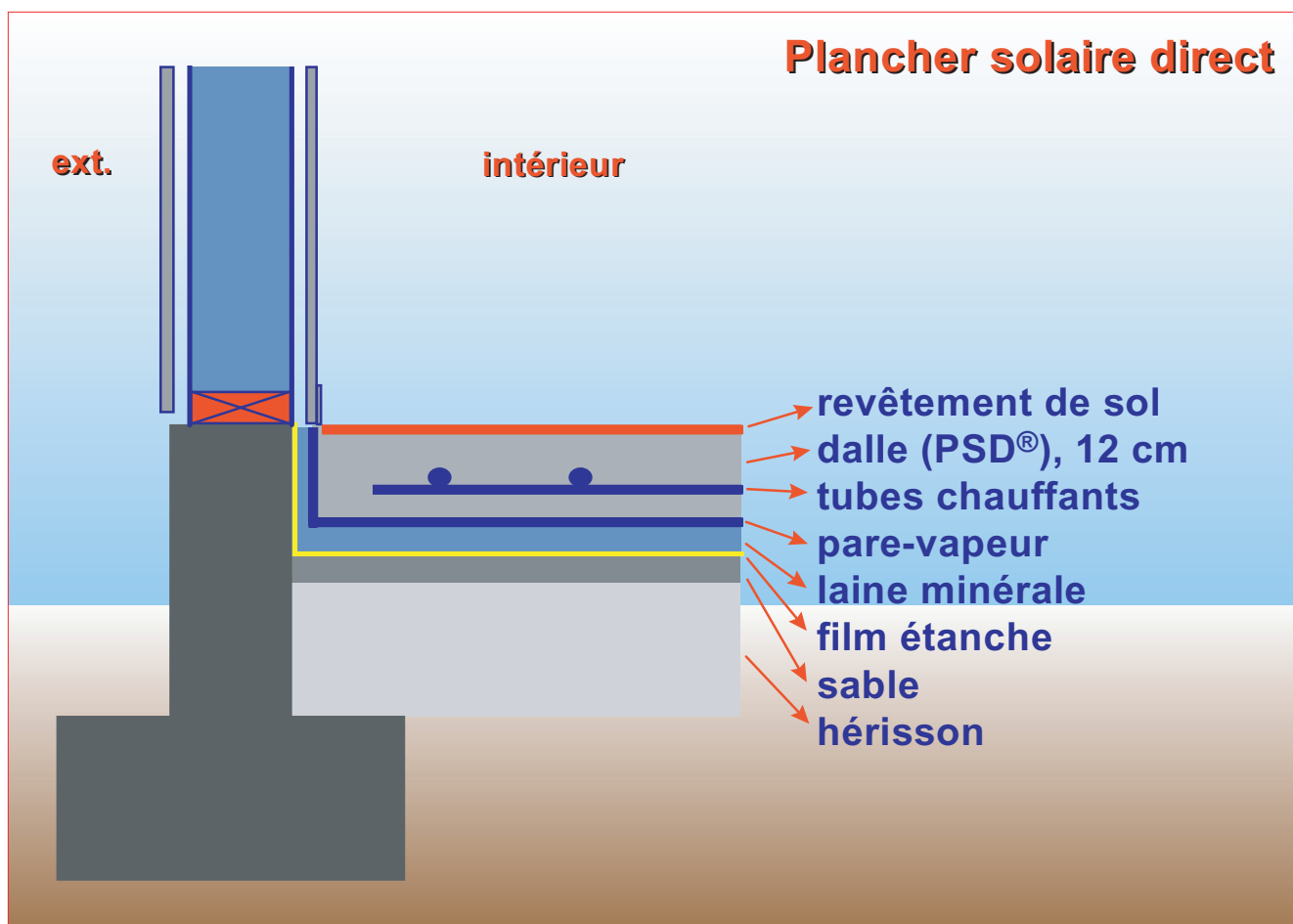
La maison Letz a choisi, pour énergie d'appoint, une chaudière au gaz naturel, qui assume le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire lorsque le soleil est absent.

Le PSD® associe des capteurs solaires thermiques à un chauffage par le sol sans nécessité d'un réservoir de stockage spécifique. Il est généralement associé à un chauffage d'appoint intégré ou séparé.



Maison Letz à Saint-Martin-d'Hères (arch. B. Burlat).

1



Plancher solaire direct

2 Coupe technique de la dalle chauffante du plancher solaire direct (PSD®).

L'Institut technico-commercial de Montefiascone en Italie associe des capteurs solaires à air à une ventilation mécanique contrôlée. La conception de l'école repose sur des techniques solaires actives et passives associées à des dispositifs d'économie d'énergie. L'économie d'énergie primaire pour le chauffage atteint 51 % par rapport à un établissement comparable de conception classique.

Le plan de l'école adopte le parti d'une faible profondeur et d'une disposition est-ouest afin de maximiser le captage des apports solaires. Long de 94 mètres, le bâtiment est large de 20 mètres et comprend trois étages. La volumétrie est fragmentée en cinq unités pédagogiques. Une cage d'escalier extérieure et une rampe conduisent à une passerelle à deux niveaux qui permet de pénétrer dans le bâtiment à travers une serre (Fig. 1).

La façade sud est composée, d'une part, de larges baies vitrées équipées de dispositifs extérieurs de protection (lames horizontales réglables en aluminium) et, d'autre part, de capteurs solaires à circulation d'air qui fournissent 25 % des besoins nets de chauffage. Une serre se développe sur plusieurs niveaux et est utilisée comme hall d'entrée, créant une zone tampon entre intérieur et extérieur. La contribution solaire passive due aux baies orientées au sud et à la grande serre atteint 22 % des besoins nets de chauffage. Les apports solaires couvrent donc 47 % des besoins nets de chauffage. De plus, de hauts niveaux d'isolation, des doubles vitrages et l'élimination des ponts thermiques minimisent les déperditions.

Les capteurs solaires à circulation d'air sont particulièrement bien adaptés dans les bâtiments scolaires où le renouvellement d'air dans les classes occupées est élevé (2,5 à 3 volumes par heure). Chacune des quatre zones thermiques du bâtiment dispose de sa propre centrale de traitement d'air. Dans la centrale, l'air neuf préchauffé par les capteurs est mélangé à l'air recyclé venant des classes et humidifié aux niveaux souhaités. L'air est ensuite soufflé vers les classes, qui disposent d'une possibilité de régulation locale (thermostat individuel agissant sur un appoint local). Les capteurs représentent une superficie de 389 m². Ils sont constitués d'une couverture en simple vitrage de 6 mm d'épaisseur, d'un absorbeur en tôle d'acier ondulée avec revêtement sélectif et d'un panneau sandwich isolant. Les entrées d'air sont situées en partie basse et l'air chaud est repris par des gaines et ventilateurs en partie haute.

Par ailleurs, 76 m² de capteurs solaires à eau couplés à un réservoir de 2 500 litres servent à la préparation d'eau chaude sanitaire. Ils assurent 40 % des besoins.

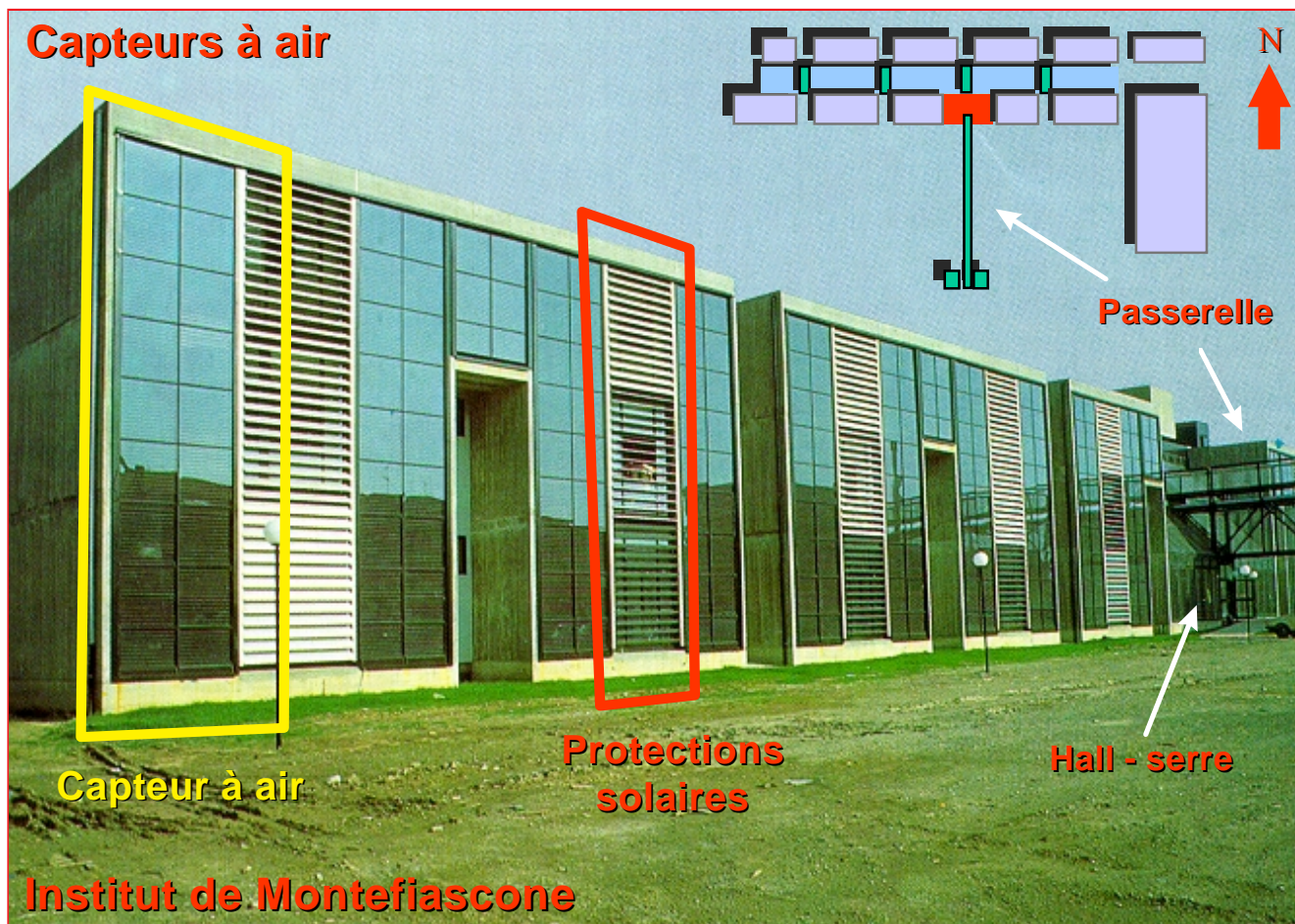
En hiver, les fenêtres sont fermées et les brise-soleil sont réglés de telle sorte que le rayonnement solaire pénètre profondément dans les classes. La ventilation mécanique assure le renouvellement d'air nécessaire.

A l'entre-saison, les brise-soleil servent surtout à prévenir l'éblouissement et les surchauffes. L'ouverture simultanée des fenêtres à l'avant du bâtiment et à l'arrière, dans le couloir, permet une ventilation naturelle.

Avec ses capteurs à air, ses baies vitrées et sa serre-hall d'accueil, l'Institut de Montefiascone économise 51 % des besoins en énergie primaire nécessaire à un établissement comparable.



1 Les fenêtres orientées au sud et la serre fournissent 22 % des besoins nets de chauffage (arch. Coop Citta e Territorio).



2 Les capteurs à circulation d'air fournissent 25 % des besoins nets de chauffage.

La technologie photovoltaïque (PV) permet aujourd'hui de convertir 10 à 20 % du rayonnement solaire incident en énergie électrique. Elle peut être intégrée au bâtiment en couverture ou en protection solaire. L'intérêt de ces systèmes est de produire de la puissance électrique au lieu même de la demande, en s'affranchissant des problèmes de stockage et de distribution. C'est pourquoi le photovoltaïque est de plus en plus une technologie de choix pour la production de courant électrique en dehors du réseau (balises en mer, téléphonie rurale, pompe à eau dans le désert, etc.). Leur intérêt vient aussi du fait que ces systèmes sont dépourvus de pièces mobiles et leur durée de vie dépasse 20 ans, sans entretien, mis à part un nettoyage régulier.

Les cellules PV sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Une installation photovoltaïque comporte plusieurs composants (Fig. 2), en fonction de sa taille et de son utilisation. Les cellules solaires en constituent l'élément principal. Elles sont interconnectées électriquement pour constituer des modules solaires, lesquels sont ensuite réunis en générateur. Par ciel clair, on peut compter sur une puissance spécifique de 80 à 140 W par m² de modules.

Le fonctionnement d'une installation PV repose également sur l'accumulateur et le régulateur de charge. Certaines installations disposent également d'un convertisseur qui transforme le courant continu produit par les champs de cellules en courant alternatif à 220 V utilisables par la plupart des appareils domestiques. Les batteries de stockage permettent, quant à elles, une utilisation différée de l'énergie emmagasinée.

Les systèmes PV se justifient aujourd'hui, malgré leur coût élevé, pour des installations aux besoins réduits et éloignées du réseau (chalet de montagne, gîte rural, pompage d'eau dans les pays en développement, etc.). Avec l'amélioration des rendements et la diminution des coûts, les systèmes photovoltaïques représentent une solution technologique d'avenir.

La figure 1 présente un exemple d'intégration de cellules PV en tant que protection solaire. Situé en Suisse, près de Bâle, ce bâtiment offre une puissance de 10 kW. Les cellules solaires, légèrement écartées les unes des autres, laissent filtrer un minimum du rayonnement solaire vers l'intérieur. D'autres systèmes, mobiles, permettent de relever les panneaux pour donner la priorité à l'éclairage naturel par temps couvert, au détriment de la production électrique.

La figure 2 décrit une installation PV type et propose un second exemple d'intégration. Il s'agit d'un chalet finlandais intégrant un générateur solaire photovoltaïque en toiture. Sa puissance, de 2 kW, fournit l'énergie nécessaire à l'éclairage, au téléviseur, au réfrigérateur ainsi qu'à l'ensemble des applications domestiques. Des batteries d'accumulateurs peuvent stocker jusqu'à une semaine complète de consommation.

La technologie photovoltaïque permet aujourd'hui de convertir 10 à 20 % du rayonnement solaire incident en énergie électrique. Elle peut être intégrée au bâtiment en couverture ou en protection solaire.

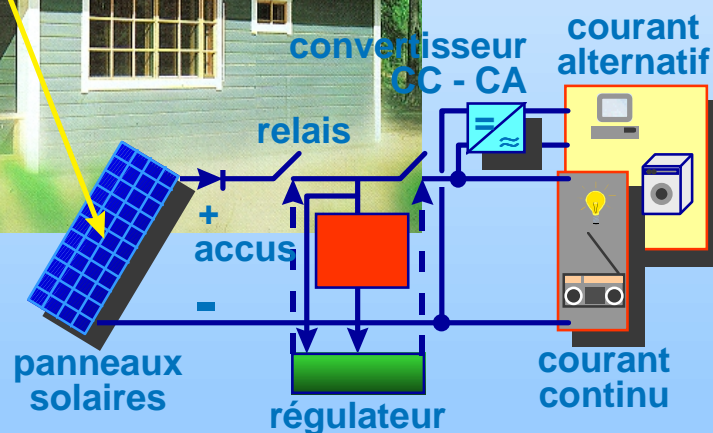


1 Intégration des panneaux PV en tant que protection solaire en Suisse (arch. Artevetro).



2 kW
Finlande

Panneaux photovoltaïques



2 Schéma de principe de la technologie photovoltaïque. Exemple d'une installation intégrée en toiture.

Équipée d'un système photovoltaïque, la maison permet non plus seulement de consommer de l'électricité mais aussi d'en produire. Les kilowattheures produits sont achetés par l'opérateur public à un tarif un peu supérieur à leur prix de vente. Deux compteurs distincts permettent d'évaluer, d'une part, la production et, d'autre part, la consommation d'électricité. Comme les électrons empruntent toujours le chemin le plus court vers son lieu de consommation, celle produite par des panneaux photovoltaïques sera d'abord consommée par l'habitation, et l'excédent sera envoyé automatiquement au réseau. Toutefois, le système photovoltaïque étant dépendant du réseau, il ne fonctionnera plus en cas de coupure d'électricité. Il ne permet donc pas d'être autonome en approvisionnement électrique, sauf à s'équiper en plus de batteries.

La taille d'un système dépend de paramètres locaux comme l'ensoleillement ou l'orientation des panneaux et de la technologie choisie. Néanmoins, on considère, de manière générale, qu'un système de 1 kWc¹ (10 m²) produit environ 1000 kWh par an. Les besoins électriques d'un foyer de 4 personnes représentent environ 2500 kWh par an (hors chauffage électrique et eau chaude sanitaire). Ainsi, un système de 25 m² (2,5 kW) peut produire l'équivalent de cette consommation. Toutefois, si ce même foyer engage une démarche d'économie d'énergie (remplacement des ampoules par des lampes fluo-compactes, appareils de classe A et suppression des veilles inutiles, etc.), il pourra dégager un excédent et en tirer quelques revenus.

L'installation de panneaux photovoltaïques coûte cher, mais les aides publiques (nationales, régionales, etc.) permettent souvent de financer plus de 50 % de l'achat. Pour un pays comme la France où l'électricité est bon marché, le retour financier est assez long. Un pays comme le Japon, où elle coûte le double, y trouve un intérêt. Mais, comme le coût de la technologie baisse chaque année, alors que celui de l'électricité ne cesse d'augmenter, on considère que le photovoltaïque sera rentable dès 2010 et 2015 pour la Californie ou le Japon, et plus tard pour les pays les moins engagés.

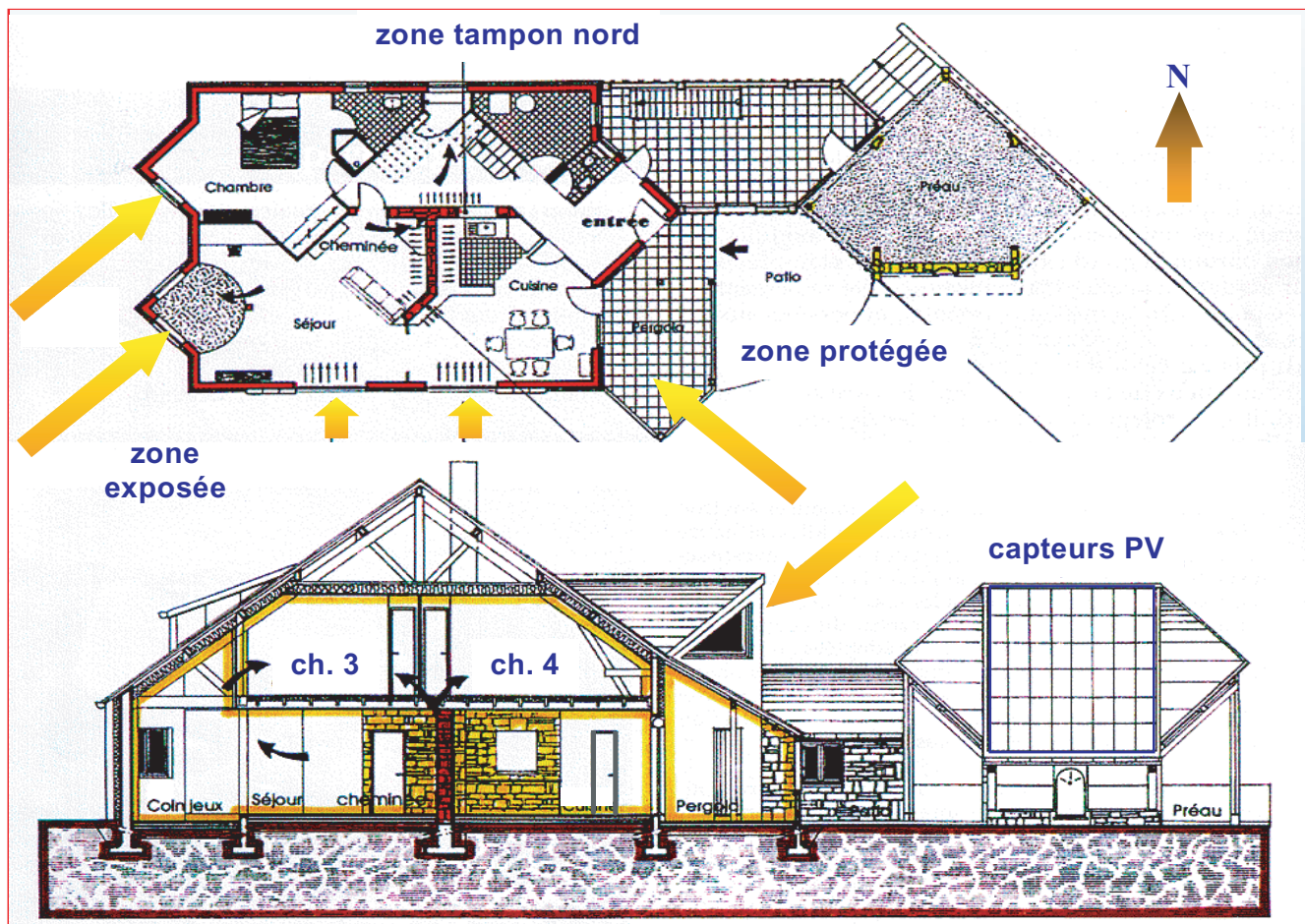
Aujourd'hui, la part du photovoltaïque dans la production totale d'électricité est anecdotique, malgré des taux de croissance de l'ordre de 30 % depuis quelques années. À condition d'être fortement soutenu politiquement, le photovoltaïque serait en mesure de fournir 20 à 35 % de l'électricité d'un pays comme la France, à l'horizon 2050. Pour cela, il suffirait d'installer 10 m² par habitant, soit 40 % de la surface disponible en toiture. Au niveau mondial, les projections tablent qu'en 2040 l'énergie photovoltaïque pourrait couvrir 26 % de la demande d'électricité.

¹ Le watt-crête (Wc, kWc) mesure la puissance théorique maximale qu'un panneau ou une installation peut produire dans des conditions standard d'ensoleillement.

Conçu comme une centrale électrique individuelle, un toit photovoltaïque connecté au réseau produit des kilowattheures, qui sont soit consommés directement par l'habitation soit injectés sur le réseau public de distribution d'électricité.



Maison Legard à Besançon 1
(arch. A. Combet).



2 Plan du rez-de-chaussée et coupe générale de la maison.

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. Cette chaleur provient, pour l'essentiel, de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre et, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre.

L'énergie théoriquement disponible est considérable : un km² de roches sur une profondeur de 10 km renferme en moyenne une quantité d'énergie de 15 millions de tep.

L'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques du sous-sol contiennent des nappes d'eau ou aquifères. Cette eau, généralement associée à des gaz dissous et à des sels minéraux, peut alors être captée au moyen de forages. On véhicule ainsi la chaleur emmagasinée des profondeurs vers la surface pour ensuite l'exploiter.

L'exploitation des ressources géothermiques n'est pas récente. Les sources chaudes ont permis l'établissement de centres d'eaux thermales réputés, comme c'est le cas à Hauterive, près de Vichy, où l'eau jaillit à la température de 60 °C (fig. 1). La centrale géothermique haute énergie la plus ancienne d'Europe est celle de Larderello en Toscane et date de 1904. Elle exploite un réservoir à dominante vapeur destiné à produire de l'électricité.

Les caractéristiques du fluide géothermal extrait, liées à celles de la formation géologique, déterminent plusieurs types de géothermie :

- Très basse énergie : nappes situées à moins de 100 mètres de profondeur et à faible niveau de température (< 30 °C). Le fluide géothermal assure le chauffage et/ou la climatisation de locaux après adaptation de sa température par une pompe à chaleur.

- Basse énergie : température du fluide comprise entre 30 et 100 °C. Elle couvre une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, procédés industriels, thermalisme, balnéothérapie, etc.

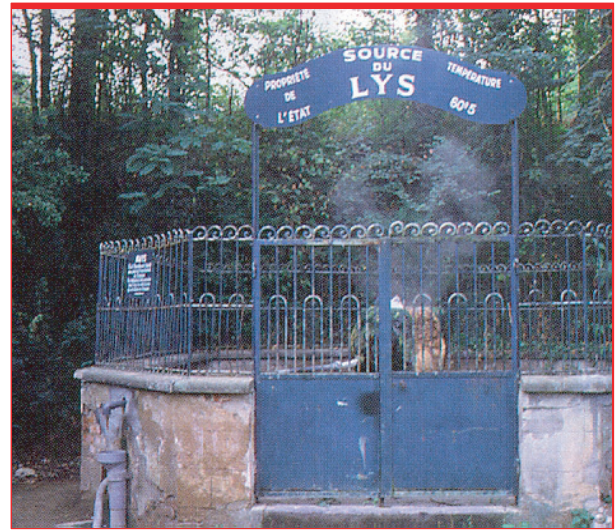
- Moyenne énergie (entre 90 et 180 °C) et haute énergie (entre 220 et 350 °C en moyenne) : elle permet de valoriser les ressources géothermales en produisant de l'électricité. Ce type d'application n'est pas encore exploité en France métropolitaine mais est déjà développé aux Antilles françaises (site de Bouillante en Guadeloupe).

Le Bassin parisien présente une très bonne adéquation entre les ressources du sous-sol et leur utilisation possible en surface (voir fig. 2). Pour des raisons de rentabilité, l'énergie est principalement utilisée pour le chauffage d'habitations collectives.

Presque toutes les opérations en région parisienne puisent dans l'aquifère du Dogger, un réservoir situé entre 1 500 et 2 000 mètres de profondeur. La température de l'eau varie de 60 à 85 °C, suivant les sites.

Enfin, les pompes à chaleur géothermales connaissent en France un fort développement depuis le début des années 2000. Leur nombre actuel a dépassé 50 000.

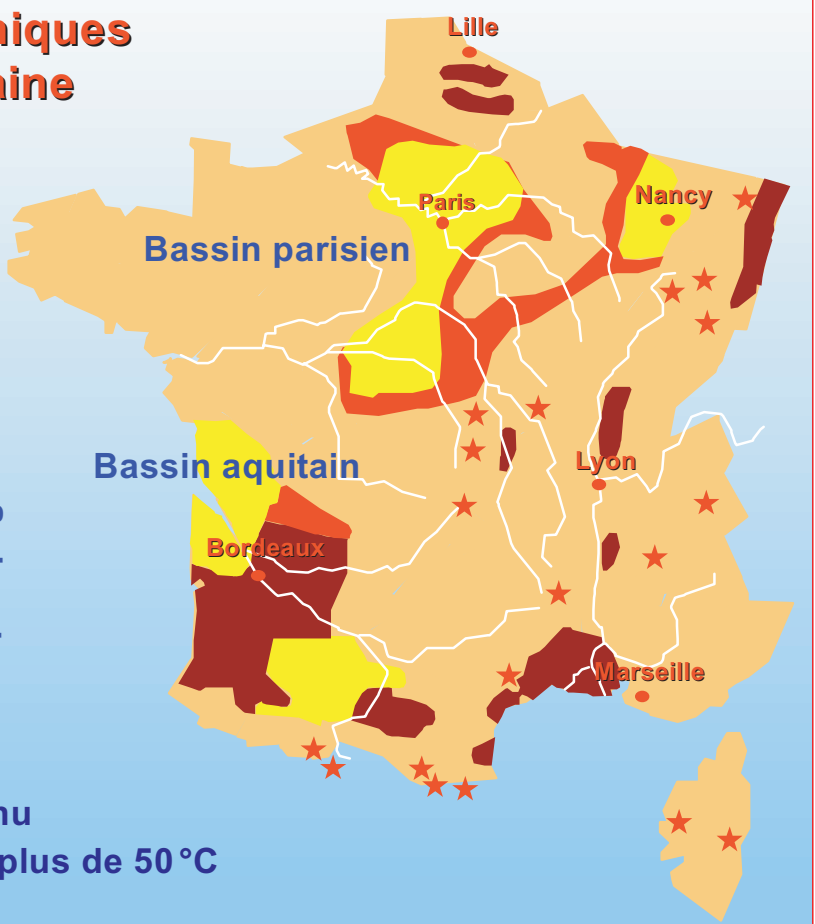
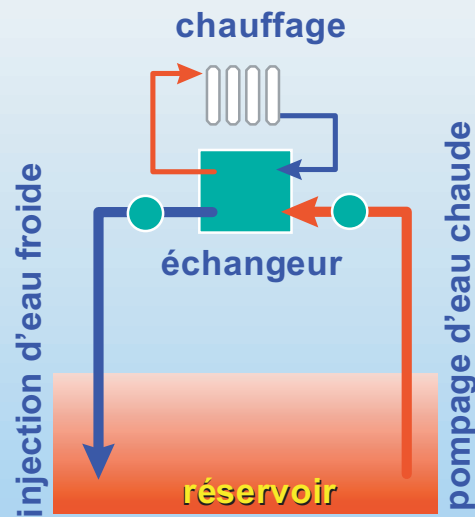
La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. Selon les sites et les températures, elle permet de chauffer des logements ou de générer de l'électricité.



Source du Lys, à Hauterive, près de Vichy.

1

Ressources géothermiques en France métropolitaine



- réservoir continu
- réserve possible
- réservoir discontinu
- source thermale à plus de 50°C

2 Schéma de principe et carte des ressources géothermiques françaises.

Du grec "Éole", le dieu du vent, l'énergie éolienne vient des mouvements des masses d'air se déplaçant des zones de haute pression vers les zones de basse pression. En effet, le soleil réchauffe le globe terrestre de manière fort inégale. Les écarts de température qui en résultent provoquent des différences de densité des masses d'air et se traduisent par des variations de la pression atmosphérique. Le vent transforme l'énergie thermique tirée du rayonnement solaire en énergie cinétique. La puissance totale de ces mouvements atmosphériques atteint le chiffre astronomique de 100 milliards de gigawatts (millions de kW).

Exploitée jadis pour la production d'énergie mécanique (moulins à vent) et pour les transports (bateaux à voile), l'énergie éolienne est aujourd'hui utilisée pour produire de l'électricité grâce aux "moulins" modernes appelés des aérogénérateurs. Leur puissance nominale varie de quelques centaines de kW à plusieurs MW. Ils sont installés au sein de parcs éoliens terrestres ou en mer. Il existe aussi de petites éoliennes de quelques kW, utilisées dans le cadre d'installations autonomes ou raccordées au réseau.

Un aérogénérateur de 2 MW commence à produire de l'électricité avec un vent d'une vitesse de 4 m/s. Il atteint sa puissance maximale à partir d'une vitesse de vent d'environ 13 m/s. Bien situé, il aura une production annuelle de l'ordre de 5 000 000 kWh, ce qui correspond à la consommation d'électricité (hors chauffage) de 2 000 foyers.

La figure 1 montre un prototype d'aérogénérateur de 5 MW, installé fin 2004 en Allemagne. Ses pales mesurent 56,5 mètres.

Deux paramètres caractérisent le vent et l'énergie qu'il est à même de fournir : sa vitesse et sa direction. L'énergie éolienne est une ressource aléatoire : derrière une vitesse moyenne du vent en un point se cachent des réalités différentes, du calme plat aux plus violentes rafales. De plus, la topographie et les constructions modifient le régime local des vents, ce qui rend nécessaire une étude approfondie du site avant toute décision d'installation.

La production d'énergie par aérogénérateur a lieu en fonction du vent et non en fonction de la demande. Dans le cas d'une installation couplée au réseau, l'énergie éolienne ne pourra représenter qu'un pourcentage minime de la production des centrales classiques : celles-ci assurant la stabilité de la production.

Les avantages des aérogénérateurs sont multiples :

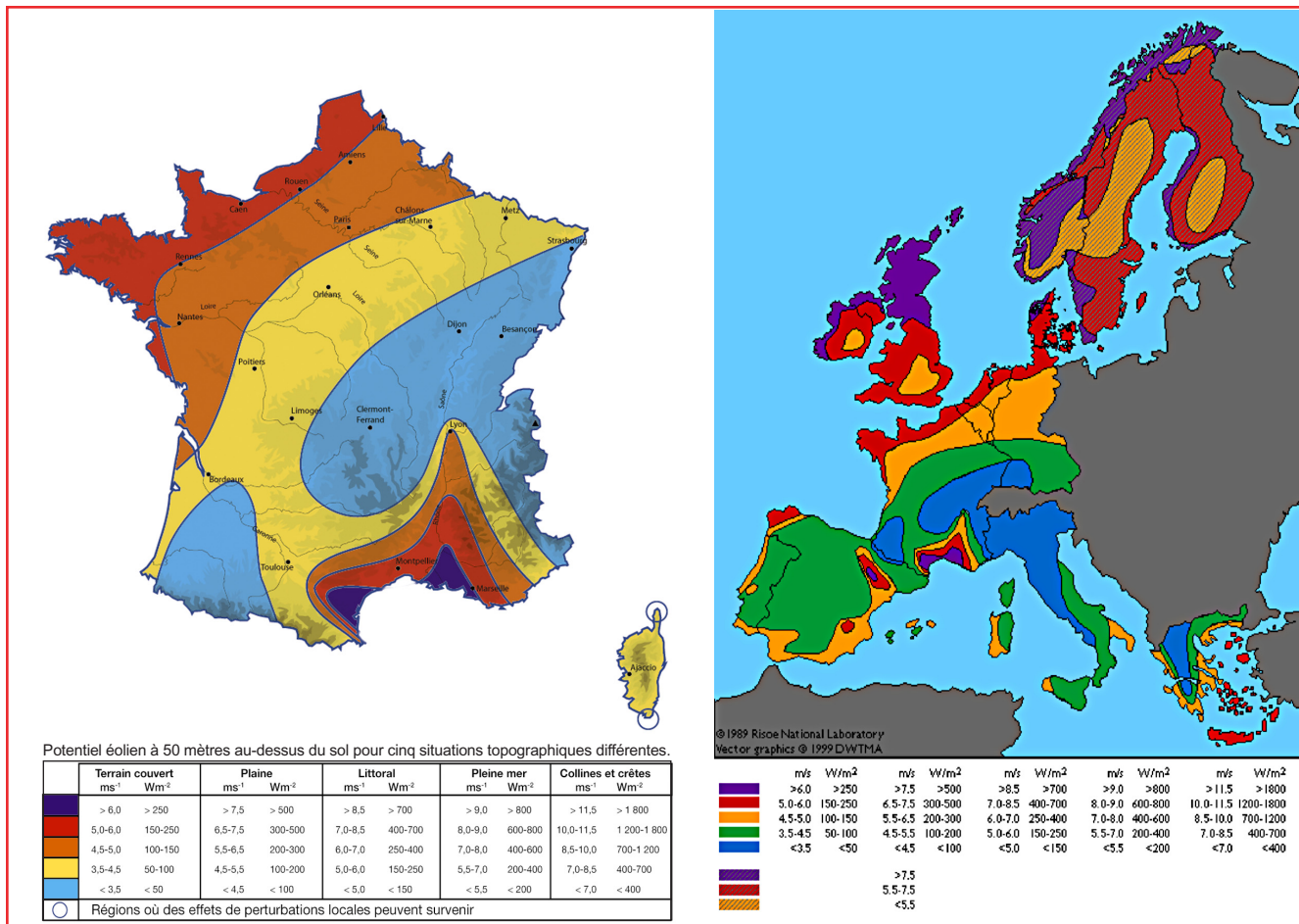
- ils utilisent une énergie renouvelable et n'émettent pas de gaz à effet de serre ;
- ils contribuent au développement de l'économie locale (énergie décentralisée) ;
- la période de haute productivité, en hiver, en Europe occidentale, correspond à la période de l'année où la demande énergétique est la plus forte.

En France, il faudrait 10 000 MW de puissance éolienne installée pour atteindre l'objectif européen visant à produire 21 % de notre consommation d'électricité à partir d'énergies renouvelables d'ici à 2010.

Le vent transforme l'énergie thermique tirée du rayonnement solaire en énergie cinétique. Les aérogénérateurs transforment cette énergie en électricité.



1 Prototype d'une des plus puissantes éoliennes installées, la Multibrud M5000 de 5 MW, développée par le groupe allemand Prokon Nord.



2 Cartes du potentiel éolien en France et en Europe.

Pour l'architecte, le bois est un matériau de construction de choix. Les bois indigènes sont nombreux et adaptés aux travaux de charpenterie et de structure. Leur emploi, jusqu'ici traditionnellement réservé à de petits programmes, trouve chaque jour des applications nouvelles, notamment depuis l'apparition du bois lamellé-collé.

La figure 2 illustre ces propos, en présentant le bâtiment du Comptoir forestier wallon, récemment construit dans les Ardennes belges. La "bulle" consiste en une structure de 51 arcs de bois scié de section marchande, assemblés et cintrés sur place par une équipe de cinq hommes. Un principe de base très simple, associé à une couverture vitrée mise en œuvre comme une peau d'écaille, pour un bâtiment sans pareil. À l'intérieur, la lumière est assez bien répartie du fait de l'épaisseur de la structure bois.

L'utilisation du bois-énergie est une option qui peut être retenue pour le chauffage des bâtiments. La combustion directe des sous-produits agroforestiers (déchets d'élagages, copeaux, sciures, bois de rebut, etc.) peut se faire dans des cheminées (10 à 20 % de rendement), des chaudières (70 %) ou des installations industrielles (80 %). La plus puissante centrale à bois d'Europe a été créée en 1985 à Vitry-le-François et brûle les résidus de scieries voisines.

En France, la ressource actuellement valorisée s'élève à 9,9 Mtep et pourrait aisément être doublée. Sur le plan environnemental, dans une forêt entretenue et en croissance, ce qui est le cas en Europe du Nord, le bilan en CO₂ est équilibré.

Outre le bois-énergie, le secteur énergétique de la biomasse couvre les filières suivantes :

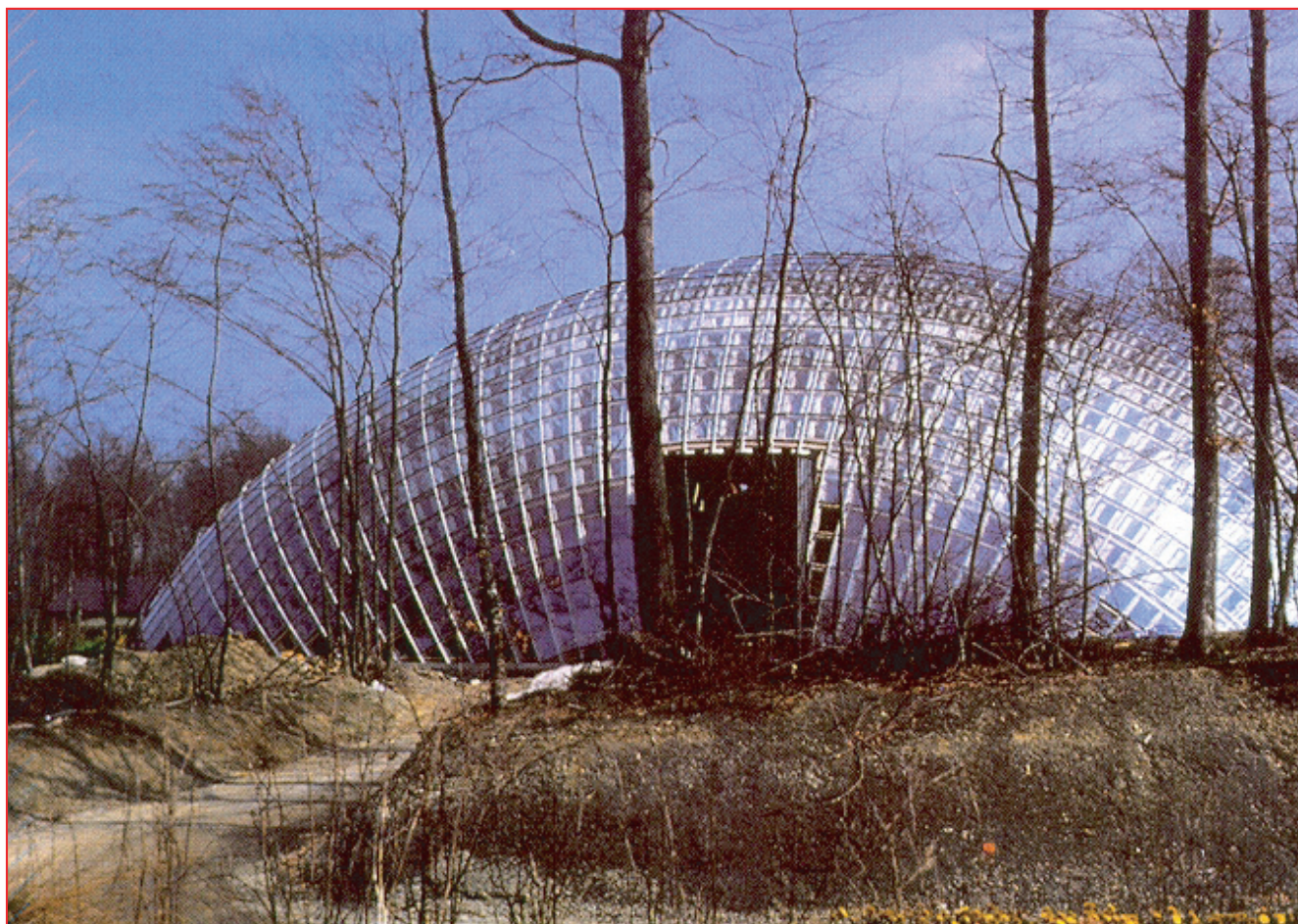
- l'incinération de déchets agricoles (ex. : la paille), de charbon de bois ou de déchets biodégradables ;
- le biogaz : production de gaz méthane obtenu par la fermentation des déchets biodégradables (boues des stations d'épuration, déchets de l'industrie agroalimentaire, déchets agricoles, déchets ménagers organiques) ;
- les biocarburants : cultures énergétiques (voir fig. 1) de végétaux riches en sucres (cannes, betteraves, etc.) ou en huiles (oléoprotéagineux : colza, tournesol, etc.).

En 2003, la Commission européenne a fixé des objectifs pour l'ensemble des pays membres en matière de pénétration des biocarburants dans la consommation européenne de carburant pour les transports. Ces objectifs sont de 2 %, fin 2005, et de 5,75 %, fin 2010. Fin 2004, on estimait que cette part était légèrement supérieure à 1 %.

Le bois est un matériau de construction de choix. La biomasse est également la première source d'énergie renouvelable valorisée en France ainsi qu'en Europe.



Derrière ces cultures peuvent se cacher **1**
des ressources énergétiques...
(Architecture +).



2 Le Comptoir forestier de Marche, en Belgique, s'occupe du traitement des graines sylvicoles des forêts wallonnes (arch. Ph. Samyn).

Première ressource renouvelable dans de nombreux pays, l'énergie hydraulique est une technologie bien maîtrisée. Son équipement ne requiert qu'un entretien et une maintenance réduits. Par la dispersion des ressources hydrauliques, cette énergie est particulièrement apte à satisfaire les besoins locaux.

Utilisée depuis la plus haute antiquité comme force motrice, l'énergie hydraulique a longtemps été l'une des principales sources de production d'électricité des pays industrialisés. En France, la première haute chute a été équipée en 1880 près de Grenoble. On parla alors de "houille blanche". Au début du siècle, les roues hydrauliques ont fait place à des turbines, elles-mêmes abandonnées à mesure que le réseau basé sur la production centralisée d'électricité s'est imposé. En Suisse, en 2002, 55 % de l'électricité produite était d'origine hydraulique.

L'énergie que l'on peut retirer des cours d'eau provient de son mouvement (énergie cinétique) et de sa position (énergie potentielle due à la différence de hauteur entre l'amont et l'aval). La puissance d'une centrale hydroélectrique dépend donc du débit d'eau et de la hauteur de chute disponible (fig. 1).

Les centrales hydroélectriques peuvent :

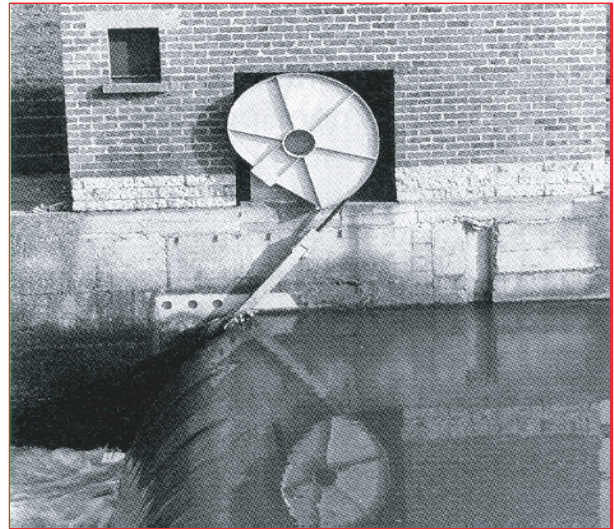
- être liées à un lac (réservoir dont le temps de remplissage est égal ou supérieur à 400 heures) ou de "haute chute" (demandant au moins 400 m pour un fonctionnement normal) ;
- être "au fil de l'eau" ou de "basse chute" (utilisant le débit tel qu'il se présente et elles ne peuvent retenir l'eau plus de 2 heures) ;
- être "éclusées" (stockant l'eau, la nuit, pour turbiner aux heures de forte demande) ;
- fonctionner par pompage entre deux réservoirs (la remontée de l'eau se fait aux heures de faible demande)

La figure 2 rappelle le fonctionnement d'une centrale hydroélectrique. L'implantation de la centrale tire donc parti d'une chute naturelle ou aménage un barrage de manière à s'assurer une hauteur de chute et un débit suffisant. Une dérivation dirige le débit vers le canal d'amenée. Ce débit est contrôlé par les éléments mobiles du barrage ou par une vanne dans le canal d'amenée. Des dispositifs de vidange permettent d'évacuer les éventuels trop-pleins. Une conduite forcée relie l'extrémité du canal d'amenée à la turbine en pied de pente, qui supporte une pression de service égal à la hauteur de chute. La turbine transforme l'énergie de l'eau en énergie mécanique. Son rendement est de l'ordre de 70 % (contre 20 % pour les anciennes roues hydrauliques). La turbine actionne l'alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, laquelle est alors autoconsommée ou revendue au réseau. Un canal de restitution permet aux eaux de regagner le lit de la rivière.

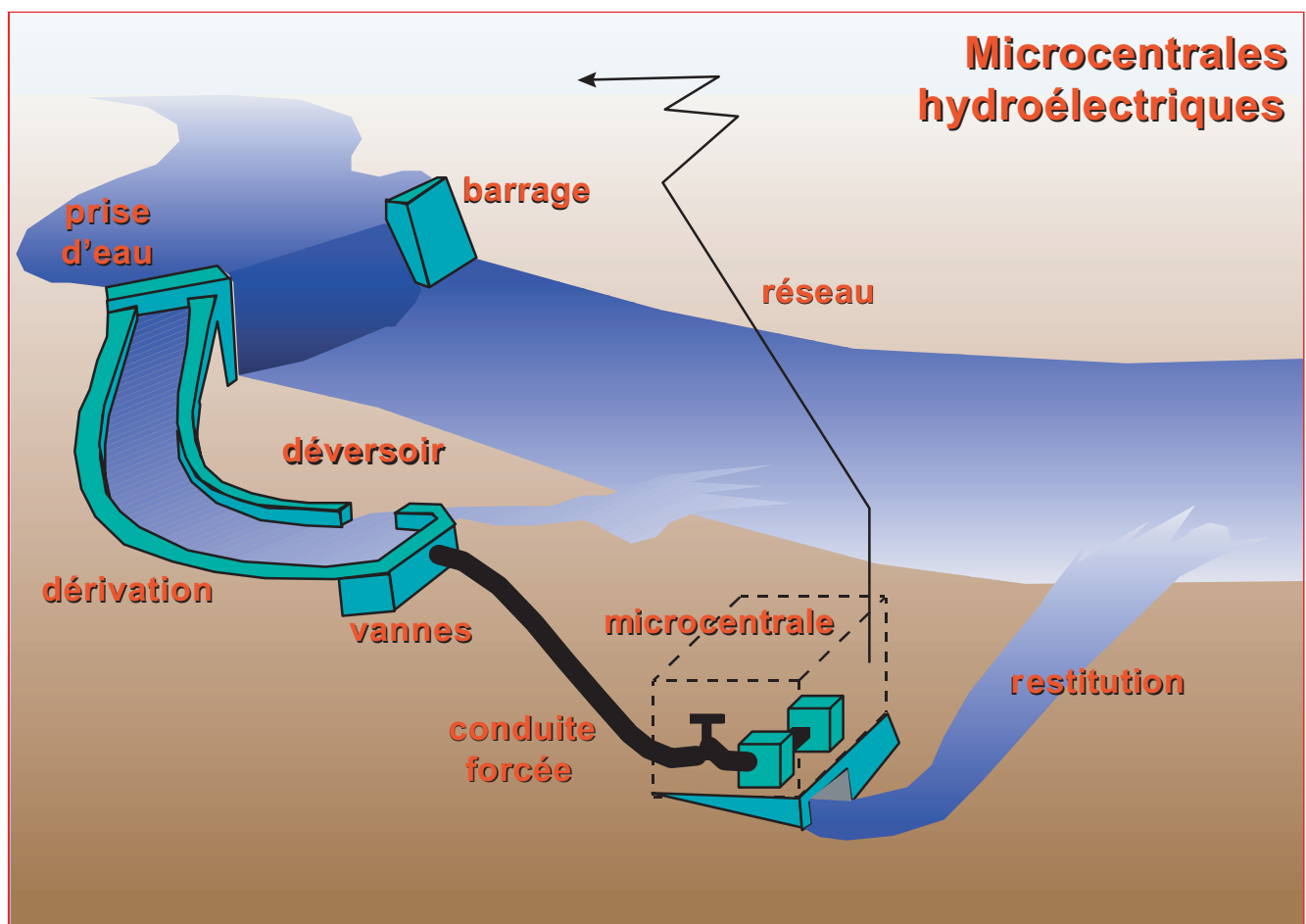
La France produit autour de 13 % de son électricité par la grande hydraulique (80 TWh/an). Cela inclut quelque 1730 sites de moins de 12 MW de puissance (micro-hydroélectricité) produisant 7,5 TWh/an, soit 10 % de la production hydroélectrique et seulement 1,5 % de la production électrique totale. Ces derniers représentent avec 2020 MW installés, l'équivalent de deux tranches de centrale nucléaire. Mais, avec la construction de nouvelles centrales, la production de la micro-hydroélectricité pourrait atteindre un total de 11 TWh/an d'ici à 2010.

L'énergie hydraulique, de technologie simple et bien maîtrisée, est renouvelable et non polluante.

Les ressources hydrauliques sont bien dispersées, pouvant ainsi répondre aux besoins de nombreuses petites communautés.



1 Le débit d'eau et la hauteur de chute déterminent la puissance d'une microcentrale hydroélectrique.



2 Schéma de fonctionnement d'une installation hydroélectrique type.

La maison Herzet est intéressante parce que, sur un site mal exposé à flanc de colline, l'architecte a réussi à l'ouvrir généreusement au soleil, grâce à un jardin d'hiver magnifique.

La maison est construite dans un bois d'arbres à haute tige. La colline fait face au nord et sa pente est trop raide ($> 16^\circ$) pour que les rayons du soleil de décembre puissent parvenir sur la façade sud au rez-de-chaussée.

La réponse de l'architecte a été de travailler la coupe du bâtiment de manière à le mettre sur la "pointe des pieds", tendu vers le soleil. Pour ce faire, il a installé le niveau du séjour au premier étage, en redescendant les chambres au niveau du rez-de-chaussée. Le mur sud a été percé d'un très généreux jardin d'hiver, sur une double hauteur, permettant à l'habitant d'apercevoir le sommet de la colline, de recevoir davantage de soleil, et tout particulièrement, davantage de lumière.

Les espaces du séjour sont alignés au sud, bénéficiant du soleil par l'intermédiaire du jardin d'hiver ou, le matin et le soir, par des petites fenêtres ouvertes sur les façades latérales. Les façades nord, est et ouest sont assez opaques. Un bandeau vitré permet à ces façades de garder un contact visuel avec la forêt. De plus, une fente lumineuse, correspondant à l'escalier, divise la façade nord en deux. Les murs sont recouverts d'un bardage d'ardoises locales.

Le jardin d'hiver peut être séparé du reste de la maison par une double porte coulissante en double vitrage. Bien qu'il ne reçoive pas le soleil en décembre, il dispense beaucoup de lumière car, en Belgique, 55 % du rayonnement parviennent sous forme diffuse. Grâce à son sommet hémisphérique, ce jardin d'hiver permet à la lumière de pénétrer profondément dans le bâtiment. Des simulations ont montré que sa température, pendant la journée, était supérieure à 20°C pendant 36 % de l'année.

Sur un site mal orienté, à flanc de colline, la maison Herzet se tend sur la pointe des pieds pour recevoir sa part de soleil.

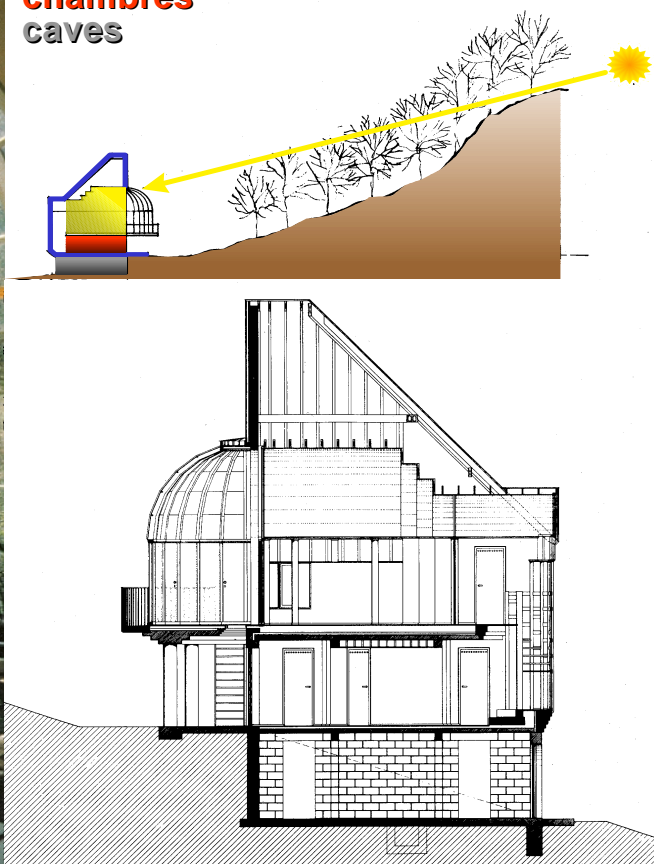


La maison, fermée au nord, s'accroche à la colline (arch. B. Albert). 1



séjour
chambres
caves

Maison Herzet



2 Vue depuis le jardin d'hiver. Coupe de principe et coupe générale du bâtiment.

Almería en Espagne (36°51'N) fait partie de la zone tempérée méditerranéenne. La ville se situe à proximité de la mer et est soumise à des vents sud-ouest dominants. La température annuelle moyenne est de 18,8 °C. L'ensoleillement est de 2 878 heures par an (6 h/j en hiver à 12 h/j en été) et les précipitations annuelles de 535 mm. Celles-ci sont présentes surtout en saison fraîche, d'octobre à avril.

Le Conservatoire de musique a été construit en 1986 et occupe au total 6 000 m² en site urbain. Un volume central sur 3 niveaux est disposé entre une rue piétonne et une petite place publique. Un second volume, de 6 niveaux, rassemble les salles de danse autour d'un patio. Au nord, une tour administrative s'élève sur 7 niveaux.

Les structures sont en maçonneries de briques creuses de terre cuite avec isolant. Les planchers sont en béton et reçoivent une chape flottante acoustique. Tous les murs intérieurs sont massifs. Les châssis de fenêtres sont en aluminium noir. Les toitures plates sont des dalles de béton recouvertes d'une étanchéité bitumineuse et d'une isolation.

Les principales caractéristiques bioclimatiques sont :

- La masse thermique importante :

En stockant la chaleur excédentaire, elle contribue à atténuer la forte variation journalière des températures (environ 12,4 °C). La masse thermique participe aussi à l'isolement acoustique des salles de répétition.

- Le travail de l'ombrage :

Dans un climat méditerranéen où l'ensoleillement est important, l'architecture bioclimatique s'attachera à rechercher l'ombrage pour éviter les surchauffes des locaux. Tous les bureaux et salles de cours sont donc protégés du soleil par un retrait de la façade. Ces retraits et, par conséquent, les avancées de toiture mettent les fenêtres à l'abri de l'ensoleillement direct. Par contre, les halls et couloirs peuvent bénéficier d'un ensoleillement direct car celui-ci n'y est pas gênant. Les terrasses, quant à elles, sont ombragées et plantées. L'élévation ouest est largement percée tandis que l'élévation est beaucoup plus fermée.

- La ventilation naturelle transversale :

Elle est facilitée par le plan masse longitudinal. Une façade est à l'ombre lorsque l'autre est au soleil, ce qui génère des différences de température entre masses d'air et donc des courants d'air. Par ailleurs, le patio et les cages d'escalier créent un réservoir d'air frais générant des appels d'air et permettant à l'air chaud de s'échapper par effet cheminée. Les circulations sont à l'air libre et reçoivent les vents dominants.

- La lumière naturelle :

La lumière du jour est modulée par les différentes proportions des fenêtres. Le patio apporte un éclairage zénithal qui se transforme en second jour latéral pour les salles de danse.

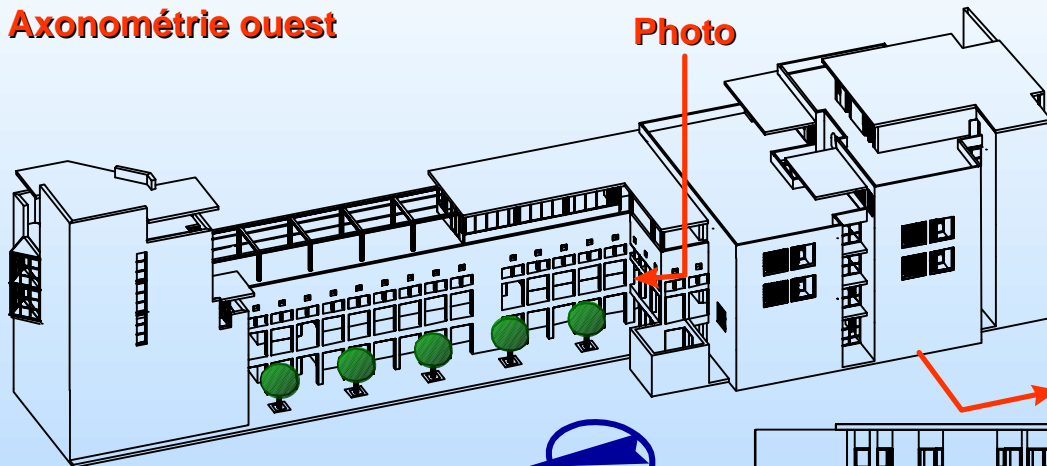
La masse thermique élevée, le travail de l'ombrage, la ventilation naturelle, la modulation de la lumière naturelle : tout concourt à se protéger du soleil.



1
Vue de la façade ouest et de la tour nord du Conservatoire de musique (arch. C. Luis-Carréa Cangas).

Axonométrie ouest

Photo



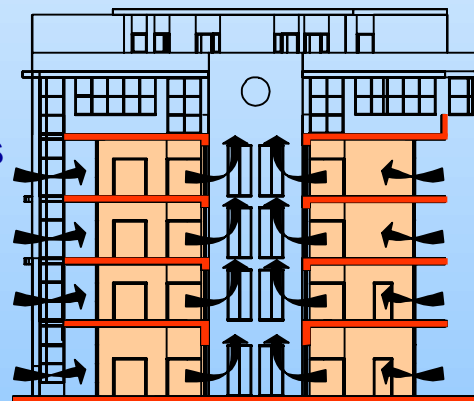
Coupe

Construction massive

Ombrage des espaces et des fenêtres (végétation, retraits, débords de toiture)

Composition en long pour une meilleure ventilation transversale

Travail de modulation de la lumière naturelle



Coupe dans le patio

2 Les principes d'architecture bioclimatique appliqués au Conservatoire d'Almería, Espagne.

En 1962, l'architecte L. Kahn est appelé à concevoir une cité universitaire à Ahmedabad, en Inde. Ce sera l'Institut indien de Gestion, dont le plan d'ensemble comprend non seulement les bâtiments facultaires mais aussi des résidences d'étudiants et des logements pour les enseignants. Le climat chaud et humide, alternant une saison chaude prolongée et une courte période plus fraîche, est accablant. La recherche de l'air est primordiale pour rafraîchir les locaux.

A travers l'orientation du plan masse, l'attention de l'architecte s'est portée sur le travail de l'ombrage, par de larges enfilades de portiques, et le travail de l'aération. L'architecte Louis Kahn explique que : "Les maisons des enseignants sont tournées vers le vent ; tous les murs sont parallèles à sa direction. Ils se mettent en épi par rapport à une cour pour l'enclorre et se conformer à la rigueur exigée par l'orientation [...] L'orientation par rapport au vent et l'ombrage ont fourni les éléments architecturaux de la composition [...] Il faut sans arrêt considérer l'orientation comme une qualité dont les gens ont désespérément besoin. C'est cela qui est à la base de ces formes diagonales."

L'orientation définitive du projet s'est établie progressivement en tenant compte de la direction des vents. L'axe de l'ensemble de la cité universitaire se réfère aux vents d'été (rafraîchissants : ouest/sud-ouest) et aux vents d'hiver (froids : nord/nord-ouest).

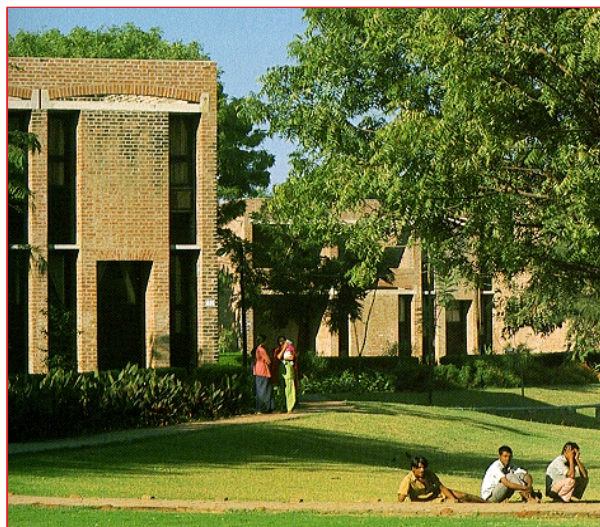
La figure 2 permet d'analyser le plan masse. Les résidences des étudiants forment au nord un bloc compact qui garantit un meilleur ombrage des cours. En hiver, le vent souffle parallèlement à la diagonale (N/N-O) des dortoirs sans s'engouffrer dans les enfilades de portiques : leur alignement faisant office de protection mutuelle.

En été, le vent (O/S-O) rafraîchit les portiques et les escaliers communs en s'engouffrant entre les deux ailes de chambres. Les arcs tendus au ras du plafond des salles communes des dortoirs assurent leur ventilation haute.

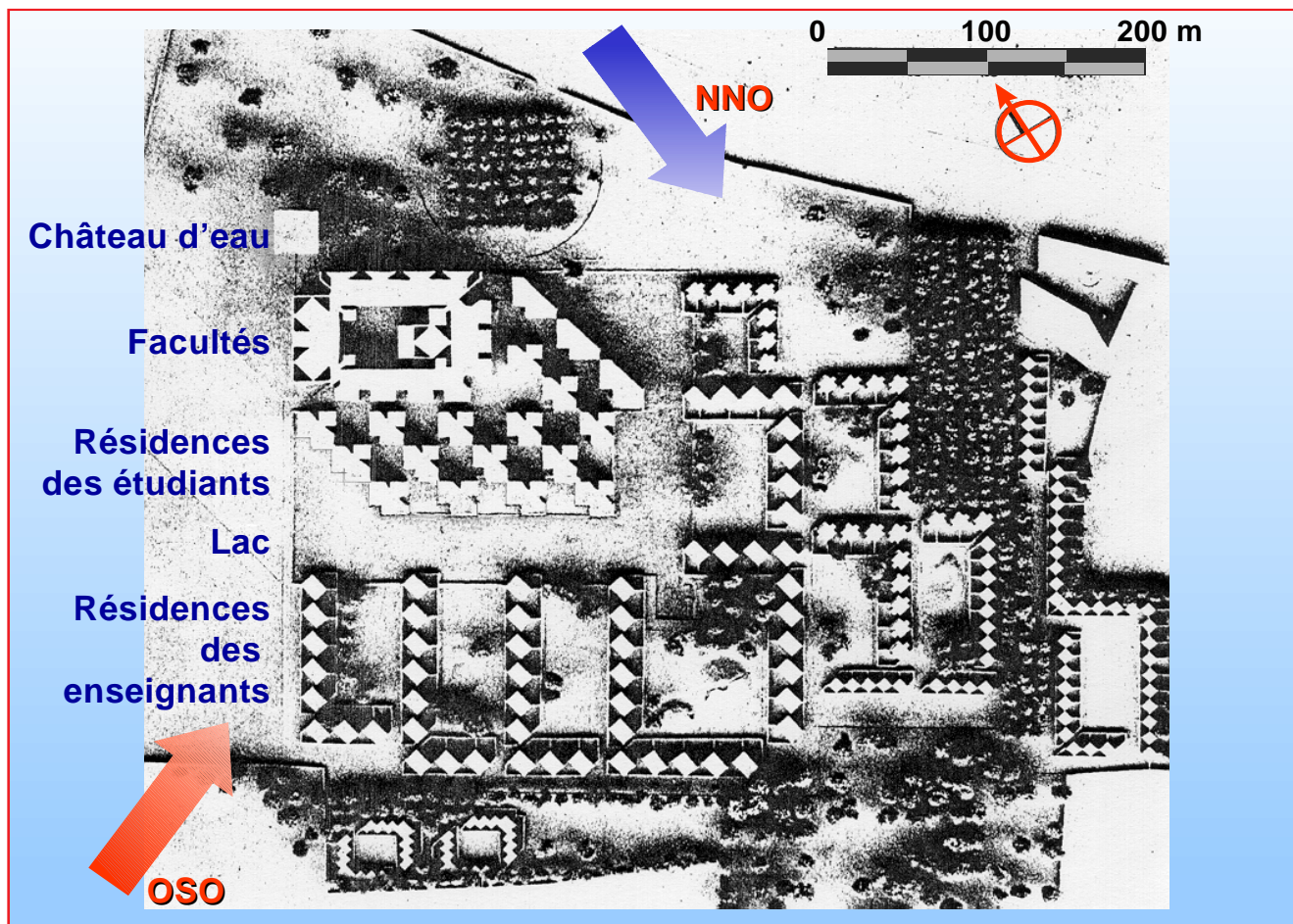
Les résidences des enseignants font face au vent d'été (Fig. 1) et lui sont ouvertes de part en part. Le plan des logements, ouvert et traversant, permet une meilleure ventilation naturelle. Par contre, les longs côtés sont complètement fermés au vent d'hiver. Les arcs tendus en pied de terrasse permettent la ventilation de celle-ci et son utilisation traditionnelle comme lieu de repos nocturne en été.

Le lac, séparant les résidences d'étudiants des logements académiques, agit comme tampon thermique.

L'orientation des bâtiments tient compte de l'ensoleillement et de la direction des vents dominants : ils sont fermés au vent d'hiver et ouverts à la brise d'été.



1 Les logements des enseignants sont ouverts au vent rafraîchissant d'été (O/S-O).



2 Plan masse de l'Institut indien de Gestion avec indication des vents dominants.

La maison Ducognon est située à Saint-Sigismon-Aime, en Savoie. Elle profite d'une situation géographique très favorable pour une conception solaire, puisqu'elle est édifée sur l'Adret (le versant exposé au soleil) à 700 mètres d'altitude, dans un site épargné par le brouillard et peu venteux.

L'architecture s'inspire de celle des chalets de la Haute-Tarentaise. Les façades du niveau supérieur associent deux matériaux : un soubassement en pierre portant une charpente en bois apparente.

Dans l'habitat traditionnel, hommes et animaux habitaient le soubassement semi-enterré tandis que la partie haute sous charpente servait de stockage, avec parfois une ou deux pièces habitables. La conception de cette maison rappelle cette organisation :

- les chambres sont regroupées au rez-de-chaussée ;
- les pièces de service occupent la partie arrière semi-enterrée : ce niveau étant peu utilisé le jour, ses ouvertures sont réduites ;
- une grande pièce à vivre est aménagée, à l'étage, autour de la cheminée centrale s'élevant jusqu'au faîtage.

Le grand débord de la toiture couvre le balcon et protège les hautes fenêtres du soleil estival. En hiver, les apports lumineux et calorifiques du rayonnement solaire, plus bas sur l'horizon, pénètrent jusqu'au cœur de l'espace.

Le chalet est chauffé, en partie, grâce à 16,20 m² de capteurs solaires intégrés en façade sud de la maison. La technique de chauffage utilisée est celle du plancher solaire direct à appoint intégré. Le complément d'énergie nécessaire au chauffage, pendant un an, s'est porté à seulement 1 250 litres de fioul. Les capteurs pourvoient également à la production d'eau chaude sanitaire tout au long de l'année.

Inspirée des chalets de la Haute-Tarentaise, la maison Ducognon est orientée plein sud et chauffée par 16,20 m² de capteurs thermiques intégrés en façade.



Maison Ducognon en Savoie **1**
(arch. B. Taillefer).



2 Les capteurs solaires sont installés en façade sud de la maison.

Inspirée des petites places traditionnelles du nord de l'Italie, les 24 logements du village de Lana di Merano se dressent face à face autour d'une petite place.

L'intention du projet était de concevoir un habitat de petit gabarit à haute densité intégrant des stratégies de conservation de l'énergie tout en améliorant les qualités environnementales liées à la géographie et à l'histoire du site. La construction et les matériaux, notamment le travail du bois de structure et de parement, s'inspirent des traditions constructives régionales.

A l'échelle de la rue, le microclimat a été modifié en concevant une petite place ou "piazza" comme un espace bioclimatique à l'air libre, orienté au sud, suivant un axe principal est-ouest et fendu de part en part pour forcer la ventilation transversale en été.

Les murs entourant la place sont parfaitement asymétriques afin de mettre en valeur les différentes orientations. Des blocs d'appartements bordent le côté nord de la place et de profondes maisons mitoyennes à deux niveaux leur font face (Fig. 2). Toutes les bâtisses faisant face au sud, la place est entourée d'un côté par les façades des blocs d'appartements et de l'autre, par l'arrière des maisons mitoyennes.

Cette rangée de maisons est divisée, en deux parties distinctes, par une ruelle permettant l'accès à la place et facilitant l'introduction des rayons du soleil en hiver. Pendant l'été, la "piazza" bénéficie d'une ombre généreuse portée par les petites maisons à pignons. Ces maisons disposent, au sud, d'un jardinet (Fig. 1).

A l'échelle de la pièce, l'énergie solaire est captée par les pièces orientées au sud par l'intermédiaire des surfaces vitrées, des jardins d'hiver et des vérandas. Les pièces orientées au nord reçoivent le soleil par des lanterneaux. Les pièces de services des appartements sont situées du côté nord pour servir d'espaces tampons contre les vents froids. Sous la place, un accès conduit au garage souterrain.

Cette petite place se présente comme un salon extérieur, lieu public et de rencontres conforme au mode de vie transalpin et accessible au plus grand nombre.

Inspirée des traditions locales, la conception de ces habitations travaille à améliorer la qualité environnementale de l'espace public.



Façade jardin orientée au sud des maisons mitoyennes. 1



2 Lana di Merano en Italie : les logements s'écartent pour faire place à un lieu public (arch. S. Los et N. Pulitzer).

Maison de vacances au bord du Pacifique (Etats-Unis)

Inspirée des tours d'observation des gardes-forestiers, cette petite maison de vacances de 78 m², sur deux niveaux, est située sur une île minuscule au large des côtes Pacifique nord-américaines.

Perchée sur le flanc d'une colline orientée plein sud, la maison s'organise en un niveau supérieur, où se trouvent les pièces à vivre, entièrement vitrées, et un niveau inférieur beaucoup plus intime et fermé, où l'on trouve deux chambres de part et d'autre d'un petit salon donnant accès à un perron.

Construite en hauteur, la maison est dégagée du terrain, comme pour se protéger de l'humidité régnant sur la côte et, plus particulièrement, dans les sous-bois. L'accès se fait par une passerelle, directement au niveau supérieur.

La maison est construite en ossature bois, ce qui correspond à son utilisation de maison de vacances. La capacité thermique étant réduite, la maison se réchauffe rapidement lorsque les vacanciers arrivent. Elle se refroidit tout aussi rapidement à leur départ. Le parement est en bois résineux à l'état scié. Sa teinte sombre s'intègre particulièrement bien aux bois de pins environnants. La toiture est également en bardeaux de bois. Des corbeaux de bois font saillie sur les façades pour recevoir des petits pontons afin de nettoyer le côté extérieur des fenêtres.

Le niveau supérieur est un lieu de confrontation avec le paysage et les éléments naturels. Tous les murs de l'unique pièce sont vitrés et permettent d'observer la nature environnante : arbres et océan. Par contre, malgré les doubles vitrages, la surface vitrée est trop importante pour être confortable. Un poêle en fonte, placé au centre de la pièce, constitue l'unique source de chaleur. Les larges avancées de toiture protègent les fenêtres du soleil tout autant que des fortes brises marines. L'absence de masse thermique et l'importance des vitrages font que l'ambiance intérieure suit d'assez près les fluctuations du climat extérieur.

L'étage inférieur, quant à lui, se présente comme un lieu de retraite plus fermé. Les chambres, situées à chacune des deux extrémités de la maison, ne disposent que de petites fenêtres. Le petit salon, au centre, s'ouvre sur un perron côté sud.

Cette maison de vacances joue sur deux attitudes vis-à-vis du climat : les pièces à vivre sont en contact avec les éléments naturels ; les lieux de repos sont plus fermés, à l'abri.



Maison de vacances dans l'Etat de Washington, Etats-Unis (arch. Miller & Hull).



2 Le niveau de vie est entièrement vitré tandis que les chambres, au rez-de-chaussée, ne disposent que de petites ouvertures.

La maison Woodbridge est située au sud-ouest de l'île North Ronaldsay, la plus septentrionale des îles Orkney. Le site est plat et balayé par les vents de l'Atlantique et de la mer du Nord. Il y gèle rarement, mais les températures n'excèdent généralement pas 15 °C. Dans la région, le chauffage fonctionne pratiquement toute l'année.

Le site se prêtant bien à l'utilisation de l'énergie éolienne, un aérogénérateur de 10 kW se dresse à 70 mètres au sud-ouest du bâtiment. La production d'énergie de l'éolienne est excédentaire par rapport aux besoins de chauffage.

La maison comprend, au nord, un ancien corps de ferme sur un niveau, en forme de L (où sont notamment situés les accumulateurs) et une extension, plus compacte. Un noyau carré comprend le salon au rez-de-chaussée et les chambres à l'étage. Cet ensemble est ceinturé par des espaces annexes : bureau, cuisine, salle à manger et jardin d'hiver à l'angle sud-ouest.

Les murs sont constitués de deux blocs de béton de 10 cm, séparés par un creux de 20 cm rempli de laine minérale. Tous les matériaux sont lourds, afin d'assurer une capacité thermique suffisante pour contrôler la variation des températures.

La toiture est isolée par 15 cm de laine minérale doublée d'une couverture de 12 mm d'uréthane. Les fenêtres sont dotées de doubles vitrages.

Le jardin d'hiver enveloppe les façades sud et ouest de la maison. Les gains solaires y sont insignifiants en hiver car le jour ne dure que 5 à 6 heures. Il joue tout de même le rôle d'espace tampon, principalement sur le plan des déperditions thermiques par infiltrations dues au vent. Les gains solaires sont beaucoup plus appréciables de mars à septembre et la température dans le jardin d'hiver est régulièrement de 10 °C plus élevée qu'à l'extérieur. Dans ces conditions, l'interface entre la maison et le jardin d'hiver est ouverte. Lorsque la température y est plus basse, le jardin d'hiver sert à préchauffer l'air introduit dans le système de récupération de chaleur de la ventilation mécanique.

La maison est équipée d'un chauffage central dont l'énergie est fournie par l'éolienne. Celle-ci chauffe un réservoir d'eau primaire de 110 litres, qui alimente les radiateurs. Le supplément d'eau chaude est pompé dans un réservoir secondaire de 2 m³, servant de réservoir de chaleur capable de faire face aux besoins de la maison pendant quelques jours, en l'absence de vent. Ces deux réservoirs sont situés au centre de la maison, pour que leurs déperditions thermiques soient un apport de chaleur pour la maison.

Le chauffage de cette maison repose sur l'emploi de l'énergie éolienne, qui fournit le principal des besoins énergétiques en hiver. La maison est hyper-isolée et un jardin d'hiver préchauffe l'air de ventilation.



Maison Woodbridge en Ecosse (arch. Jacques & Adams). 1



2 La production d'énergie de l'éolienne est excédentaire par rapport aux besoins de chauffage.

Un ensemble de bâtisses est ici transfiguré par une approche bioclimatique sensible qui, dans le respect du lieu, ouvre largement au soleil.

La construction est formée à l'origine de l'agglomérat de trois petits corps de bâtiment, autour d'une cour intérieure encaissée. Les murs massifs, montés à la terre, confèrent au tout une inertie thermique appréciable dans une région aussi ensoleillée que les Pyrénées.

Les travaux de réhabilitation ont entièrement réorganisé les lieux. En effet, le séjour occupait à l'origine la pointe nord du bâtiment. Mal éclairé par une unique fenêtre orientée vers le nord/nord-ouest, ce séjour trapézoïde n'était accessible qu'à travers la cuisine, qui faisait office d'entrée principale. Les trois chambres en enfilade imposaient également certaines contraintes d'usage.

A présent, l'espace a gagné en fluidité et en agrément. Un espace de distribution sépare la partie jour (côté sud-ouest) de la partie nuit (côté nord-est). Un sas d'entrée trouve logiquement sa place à leur intersection. Une chambre supplémentaire est aménagée à l'étage. Chaque recoin ou anfractuosité est exploitée, ici, pour un escalier, là, pour un lave-mains, etc.

La nouvelle distribution intérieure a été conçue de manière à favoriser l'ensoleillement de chaque pièce en fonction de sa période d'occupation dans la journée, tout en préservant les vues les plus intéressantes. A cet effet, les pièces principales sont maintenant ouvertes sur la cour.

L'inversion de la pente du toit du salon (autrefois cellier) bénéficie à la cour car elle reçoit maintenant les rayons du couchant se glissant au-dessus du toit, ou traversant le salon de part en part, via des ouvertures se faisant face. On retrouve également de tels effets de transparence dans le séjour et la cuisine. Un maximum de hauteur a été récupéré en façade sud pour laisser entrer le soleil, ouvrir la vue sur la montagne et combattre l'effet de cour encaissée.

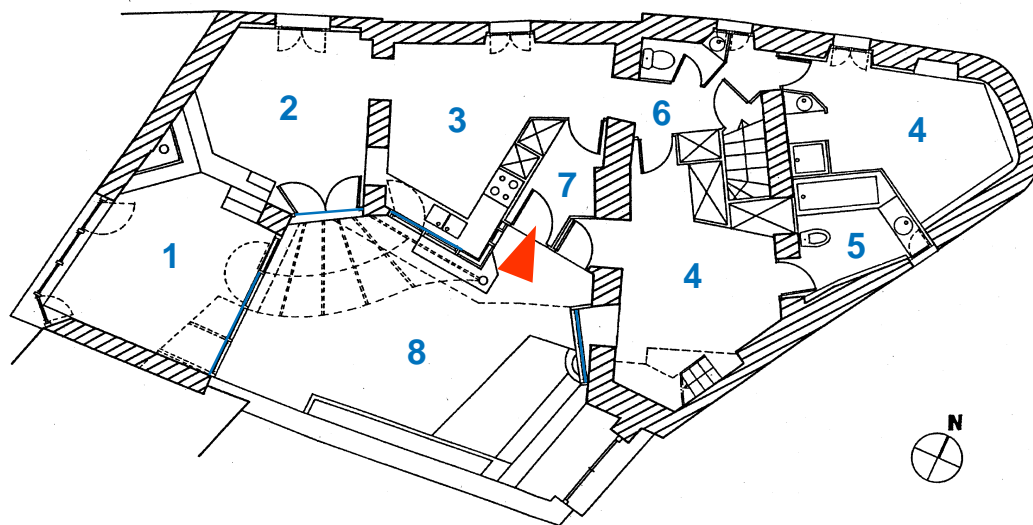
Côté chambre, un singulier bow-window, élancé sur une double hauteur et disposé légèrement en avant de la façade, égaie la pièce autrefois très sombre. Des volets roulants à lames orientables permettent de doser finement la lumière.

Bénéficiant à présent du confort sanitaire moderne, la maison a conservé les maçonneries originelles lorsque celles-ci étaient bien exposées. Les autres ont été doublées d'une isolation par l'intérieur et les plafonds ont reçu un matelas de laine minérale. L'eau chaude sanitaire est fournie par des capteurs solaires intégrés dans l'auvent protégeant l'entrée. Un ballon solaire de 150 litres est complété d'un petit appoint électrique.

Dans le respect du lieu,
un agglomérat de
bâtisses se
métamorphose en
maison sur cour, ouverte
au soleil.



1 Vue de la maison Pedrero depuis la cour, orientée au sud (arch. Y. Jautard).



- | | | | |
|---|------------|---|--------|
| 1 | Salon | 7 | Entrée |
| 2 | Séjour | 8 | Cour |
| 3 | Cuisine | | |
| 4 | Chambre | | |
| 5 | Bains | | |
| 6 | Dégagement | | |

**Maison Pedrero
(Pyrénées-orientales)**

2 Plan de la maison Pedrero après réhabilitation.

Réhabilitation d'un immeuble de logements collectifs dans la Drôme (France)

La commune de Crest, dans la Drôme, a souhaité rénover un ensemble de logements sociaux, le quartier Mazorel, formé de deux barres de 4 niveaux, d'une soixantaine de mètres de long, disposées nord-sud.

Les travaux ont commencé par la pose d'une isolation extérieure, un réaménagement des abords et un ravalement complet des façades, pour se poursuivre par une remise aux normes ainsi qu'une amélioration du confort des logements : électricité, remplacement des appareils sanitaires et des menuiseries. Enfin, les serres ont été construites en façade en prolongement des séjours de chaque logement (Fig. 2).

La structure porteuse des serres est assurée par des poteaux métalliques, remplis de béton, supportant un empilement de quatre serres. Les planchers sont constitués d'une dalle en béton armé et le toit qui recouvre chaque ensemble est réalisé par des bacs acier avec complexe isolant. Les façades des serres sont totalement vitrées par des menuiseries en aluminium avec simple vitrage.

D'un point de vue bioclimatique, la bonne orientation initiale (pièces à vivre au sud et services au nord) et le fait que tous les appartements soient traversants, ont permis à l'architecte de disposer systématiquement les serres au sud et d'agrandir ainsi la surface des séjours de 8 m², portant leur surface totale à 25 m². Parce qu'elles sont confortables, les serres peuvent servir aussi bien de salle à manger que de jardin d'hiver.

En hiver, la serre préchauffe efficacement l'air neuf entrant par les bouches d'aération hygroréglables disposées en façade. L'air est ensuite pulsé par une ventilation mécanique contrôlée classique. En été, les surchauffes sont maîtrisées par une capacité d'ouverture de la serre très importante par le plafond, servant de pare-soleil au séjour, et par la possibilité d'assurer une ventilation transversale grâce à la double orientation du logement.

La cité Mazorel se distingue également par :

- La production d'eau chaude sanitaire solaire assurée par 39 m² de capteurs solaires thermiques placés sur le toit-terrasse (Fig. 1). Ces capteurs sont reliés à un stockage de 750 litres. Un appoint de chaleur local par chauffe-eau électrique est possible dans chaque appartement.

- La réalisation de deux murs Trombe disposés aux extrémités de la façade sud des bâtiments et servant à chauffer une partie des logements d'angle. Les surchauffes possibles en été sont limitées par des brise-soleil statiques filant sur toute la longueur du mur Trombe et, bien sûr, par la fermeture des ventilations communiquant l'air chaud vers l'appartement. A titre expérimental, un des murs Trombe est équipé d'un isolant transparent à la place du vide d'air (Fig. 2), ce qui devrait améliorer son efficacité.

- Le choix d'une énergie moins polluante pour le chauffage collectif : le gaz naturel remplace le fioul.

Les serres agrandissent les séjours, améliorent la ventilation et jouent un rôle de régulation thermique. Les murs Trombe apportent un complément de chauffage. Les capteurs solaires assurent une partie du chauffage de l'eau sanitaire.



1 Vue d'ensemble de la Cité Mazorel après réhabilitation. Sur le toit-terrasse : les capteurs solaires (arch. S. Jauré).



Mur Trombe doté d'un isolant transparent

Réhabilitation de la Cité Mazorel (Drôme)

La serre offre un lieu neuf et bénéficie au climat intérieur



2 Les travaux ont permis d'offrir un complément d'espace aux habitants, grâce aux serres, et d'intégrer des éléments bioclimatiques comme les murs Trombe.

Les principaux climats sont définis en fonction de la température et de l'humidité. On distingue ainsi 4 catégories de climats en fonction de la température :

- **froid**, pour des températures moyennes annuelles de moins de 10 °C ;
- **tempéré**, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 10 et 20 °C ;
- **chaud**, pour des températures moyennes annuelles comprises entre 20 et 30 °C ;
- **très chaud**, pour des températures moyennes annuelles supérieures à 30 °C.

Ainsi que 2 catégories en fonction de l'humidité :

- **sec**, pour une humidité relative inférieure à 55 % ;
- **humide**, pour une humidité relative supérieure à 55 %.

Les climats chauds se subdivisent en plusieurs zones climatiques :

- **climat équatorial**, qui se caractérise par une très forte humidité, des précipitations élevées, des températures chaudes et une faible amplitude thermique ;
- **climat tropical humide**, qui se caractérise par une saison de fortes pluies chaudes et une saison sèche plus froide ;
- **climat tropical sec**, qui se caractérise par trois saisons : une saison chaude et sèche, une saison très chaude et une saison chaude de pluies. L'amplitude thermique entre le jour et la nuit est supérieure à 5 °C ;
- **climat désertique**, qui se caractérise par une période chaude à très chaude et une période froide. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants, les précipitations rares.

A ces climats s'ajoutent quelques cas particuliers :

- **le climat tropical d'altitude** ;
- **le climat tropical des îles** ;
- **le climat tropical de mousson, dit climat composite**, qui se caractérise par une période chaude et sèche et une période chaude et très humide : c'est la saison des moussons.

Et par extension aux zones subtropicales, on a :

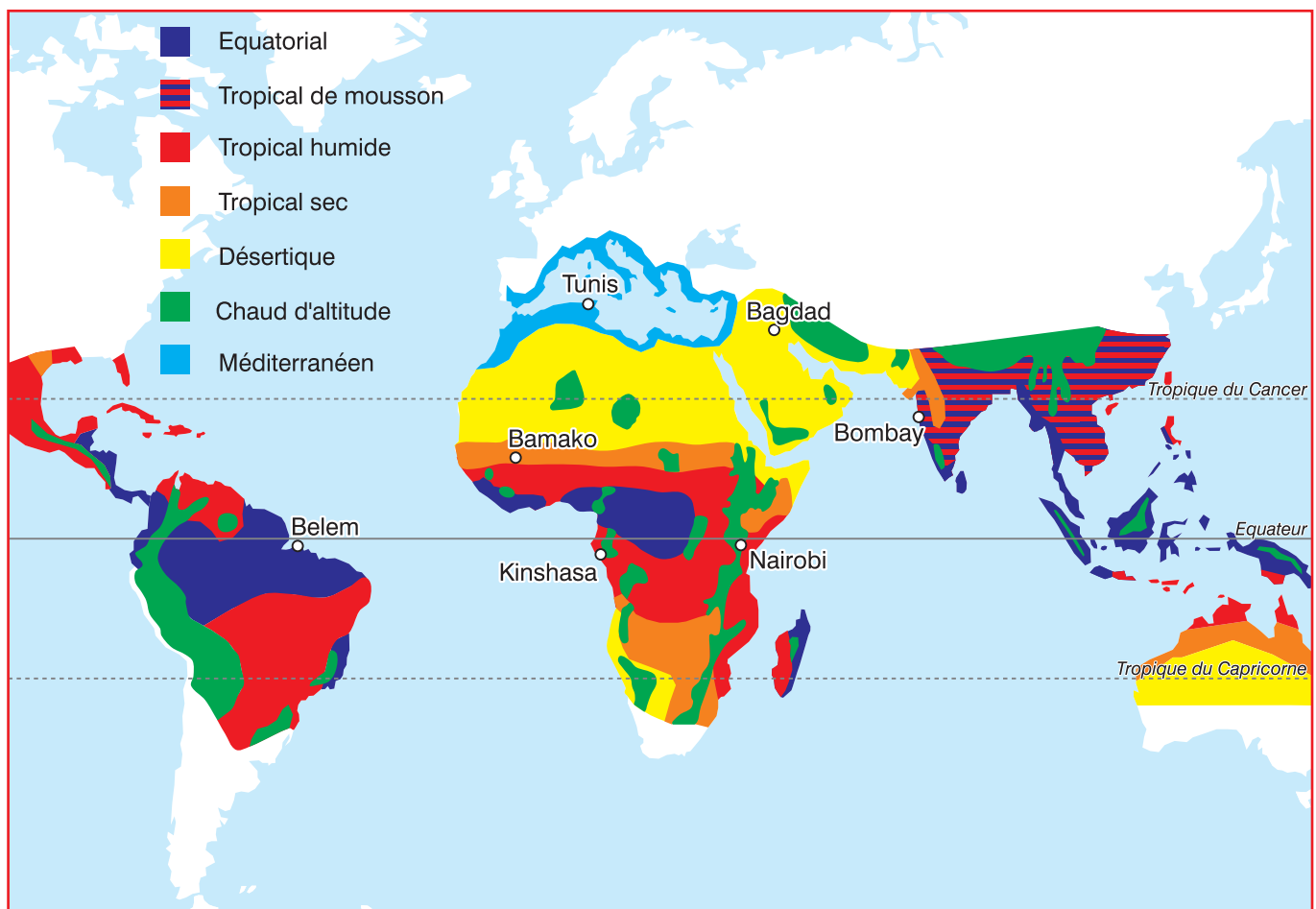
- **le climat subtropical, dit méditerranéen**, qui se caractérise par un été chaud et un hiver tempéré.

Les limites entre les différentes zones ne sont pas précises. Il existe, entre deux zones climatiques principales une zone dite de transition. Ainsi, chaque zone climatique est subdivisée en sous-zones en fonction de certains critères, comme la durée de la saison sèche. Il est important pour l'architecte de se familiariser avec les caractéristiques climatiques d'un environnement afin de les intégrer à sa démarche.

Les climats chauds désignent le climat méditerranéen et les six régimes climatiques de la ceinture tropicale : équatorial, tropical humide, tropical de mousson, tropical sec, désertique et chaud d'altitude.



Flore tropicale - flore désertique. 1



2 Carte du monde avec les différentes zones climatiques chaudes (*Construire avec le climat* - Groupe de recherches et d'échanges technologiques - Gret).

Le climat équatorial couvre les régions proches de l'équateur. Il englobe ainsi Belem en Amazonie, Mbandaka et Bangui en Afrique Centrale, Singapour en Indonésie. Ce climat se caractérise principalement par une absence de saisons différenciées.

Les températures varient de 22 à 32 °C. Les amplitudes thermiques diurnes et annuelles sont très faibles, de l'ordre de 5 °C sur la journée et de 1 °C sur l'année. Les températures sont élevées et constantes.

Le niveau moyen annuel des précipitations est de 2 500 mm. Les pluies sont uniformément réparties tout au long de l'année. Leur niveau peut atteindre 70 mm par heure pendant les grosses averses. Les brouillards au sol sont fréquents en matinée et il pleut régulièrement dans l'après-midi. L'humidité est très importante, proche de la saturation.

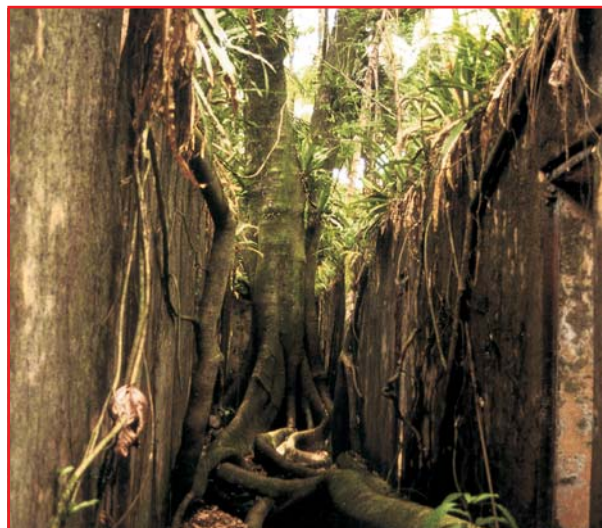
La pression basse favorise la stagnation des masses d'air. Les vents sont faibles et à dominante est. Leur vitesse augmente pendant les tempêtes de pluie.

La couverture nuageuse est de 60 à 90 % et évolue peu le long de l'année. Le ciel est généralement nuageux et couvert. La radiation solaire directe est modérée, mais la radiation solaire diffuse est importante.

La chaleur excessive, l'immobilité de l'air et l'humidité très élevée favorisent la présence d'une végétation luxuriante. Le sol est humide et le niveau de la nappe phréatique proche de la surface.

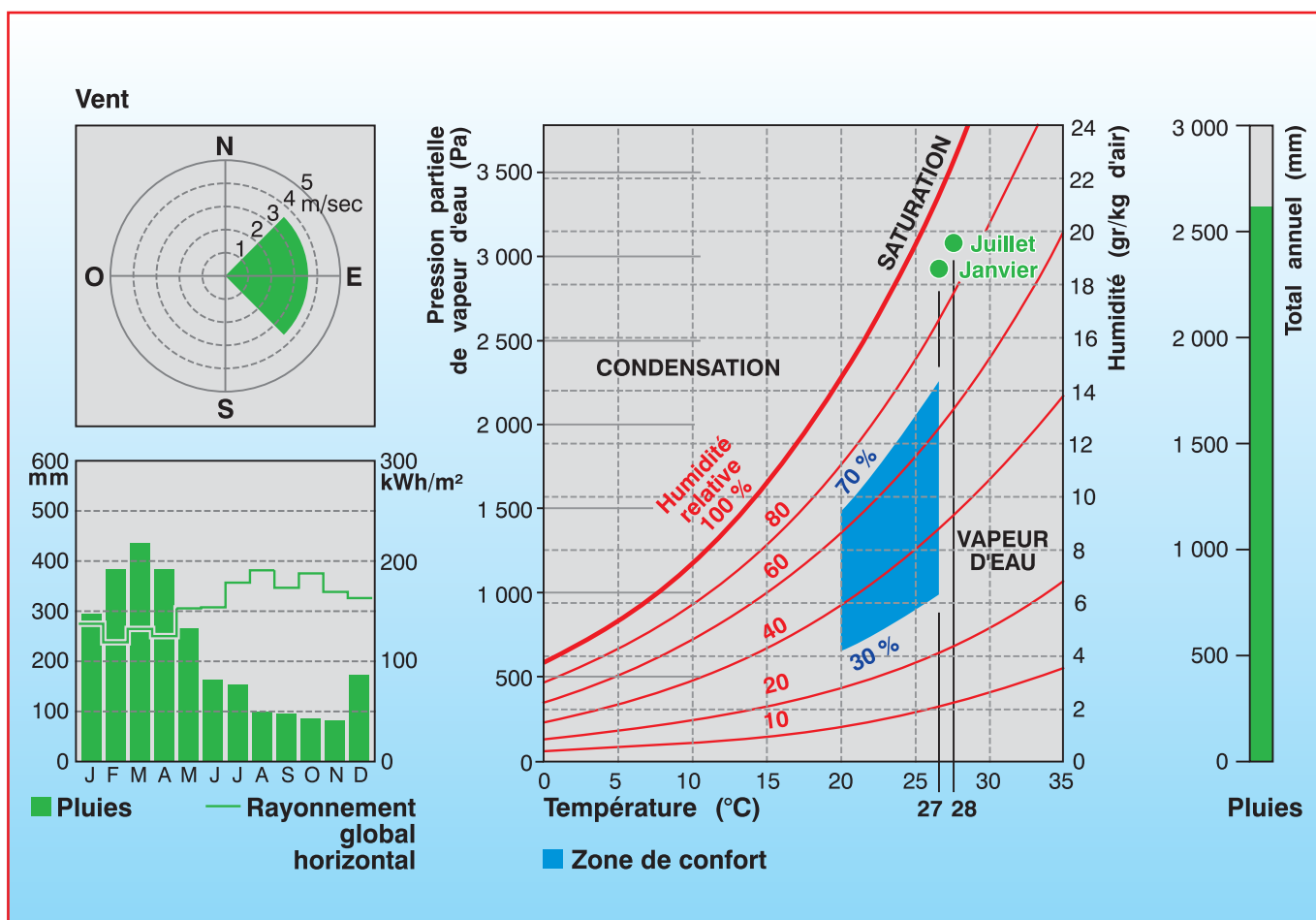
Cette fiche présente les caractéristiques climatiques de Belem. Le diagramme psychrométrique indique que les températures et les humidités relatives se trouvent hors de la zone de confort. Ce climat est difficile pour le corps humain et les constructions. Les matériaux exposés à l'air libre rouillent facilement et les matières organiques pourrissent rapidement. L'habitat vernaculaire privilégie des constructions largement ventilées afin de pallier à l'excès d'humidité. L'utilisation de matériaux susceptibles de stocker la chaleur est évitée.

Le climat équatorial se caractérise par une très forte humidité, des précipitations importantes, des températures élevées et une faible amplitude thermique. Les saisons sont peu différenciées.



Végétation et bâtiments en ruine (Guyane française).

1



2 Les caractéristiques du climat de Belem (Brésil). Latitude -1°28' Sud ; altitude 5 m.

Le climat tropical humide couvre la zone équatoriale des latitudes 20 ° nord à 20 ° sud. Il englobe ainsi Jakarta, Dar-es-Salam, Caracas. Ce climat est marqué par deux saisons distinctes : la saison des pluies et la saison sèche.

La saison des pluies du climat tropical humide est caractérisée par des précipitations abondantes sur plusieurs mois consécutifs. La hauteur annuelle des pluies varie de 800 à 1 500 mm par an, elle peut atteindre 5 000 mm dans certaines régions. Durant cette saison, les écarts de température diurnes sont faibles (inférieurs à 10 °C). La durée de la saison des pluies diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur.

Le reste de l'année, ce climat se caractérise par une absence de pluie, c'est la saison sèche ou froide. Les journées et les nuits se rafraîchissent avec un abaissement des températures en dessous des 20 °C. La saison sèche dans l'hémisphère nord correspond à la saison des pluies dans le sud du globe et inversement.

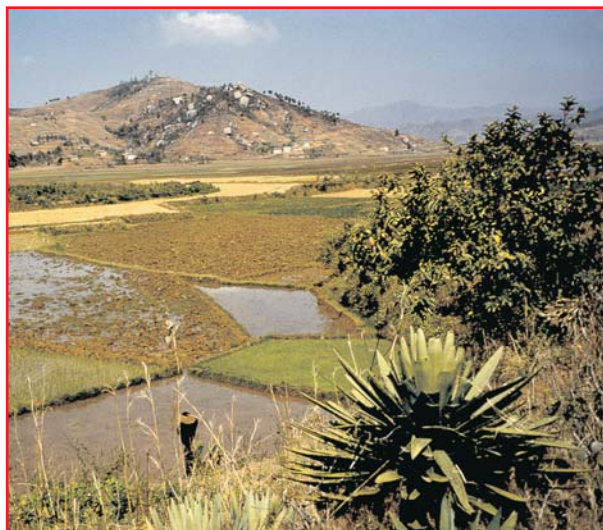
Les vents alizés influencent le climat tropical humide. Ils soufflent du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord et du sud-ouest au nord-est dans l'hémisphère sud. Les vents locaux sont faibles et les périodes calmes fréquentes. Les orages locaux sont accompagnés de rafales de vent soufflant à 60 km/h et pouvant atteindre les 100 km/h. Les vents dominants soufflent d'une à deux directions.

Au niveau du tropique du Cancer, le climat composite est influencé par les moussons qui soufflent de l'océan vers le continent. La fiche climatique de la ville de Bombay illustre ce climat mixte dit "tropical de mousson".

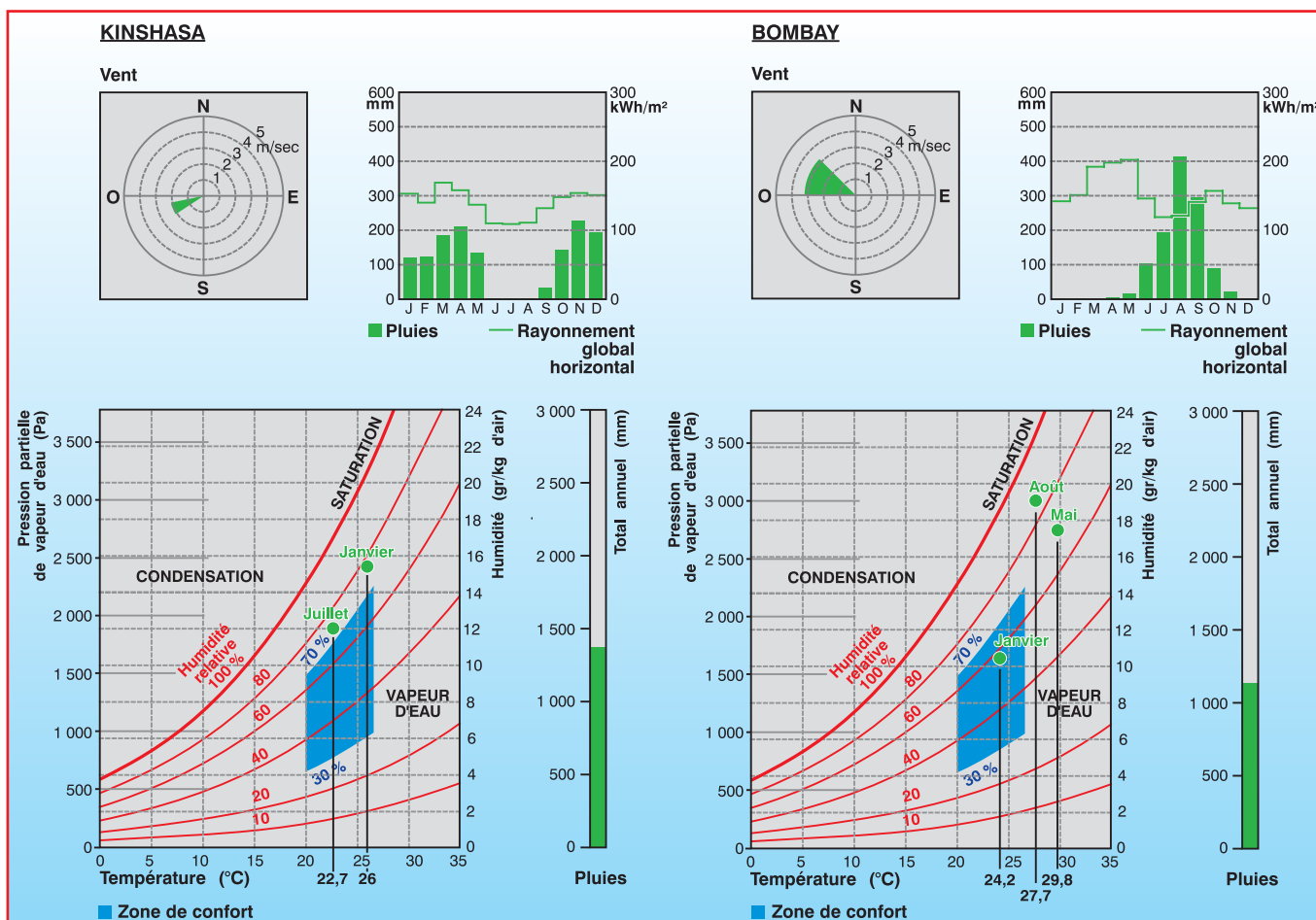
Les vents de mousson qui soufflent au niveau de l'équateur font grimper les températures de la saison sèche. Les écarts de températures journaliers faibles pendant la saison humide s'intensifient durant la saison sèche durant laquelle ils peuvent atteindre jusqu'à 15 °C. En s'éloignant de l'équateur, on rencontre une troisième saison, sèche et froide comme l'illustre la fiche climatique de Bombay.

L'humidité relative est élevée, mais inférieure à celle de la zone équatoriale. Les pluies de mousson sont abondantes et prolongées, 38 mm de pluie peuvent tomber en une heure. Les précipitations peuvent atteindre 250 mm pendant la saison pluvieuse. Le total annuel est d'environ 1 300 mm. Au niveau des tropiques, la végétation pousse de façon spontanée.

Le climat tropical humide se caractérise par une saison humide et une saison sèche. Le climat tropical de mousson est composé de deux périodes chaudes : l'une sèche et l'autre de fortes pluies de mousson.



Culture du riz en zone tropicale humide (Madagascar). 1



2 Les caractéristiques du climat tropical humide de Kinshasa (R.D. Congo). Latitude -4°19' Sud ; altitude 340 m. Les caractéristiques du climat tropical de mousson de Bombay (Inde). Latitude 19°17' Nord ; altitude 5 m.

Le climat tropical sec s'étend de part et d'autre de l'équateur de 10 à 15 ° de latitude nord et de 15 à 30 ° de latitude sud. C'est la zone dite de la savane sèche. Le climat englobe ainsi le nord du Mexique, le Burkina Faso, le centre nord de l'Australie, le nord-est de la Namibie, le Sénégal. Cette zone connaît trois saisons : la saison des pluies, la saison chaude et sèche et la saison très chaude.

Pendant la saison sèche, la température annuelle moyenne oscille entre un minimum de 23 °C et un maximum de 33 °C. En saison des pluies, ces valeurs sont respectivement de 25 °C et de 30 °C. La différence de température entre le jour et la nuit est importante. En moyenne, elle est de 7 °C pendant la saison des pluies et de 11 °C pendant la saison sèche.

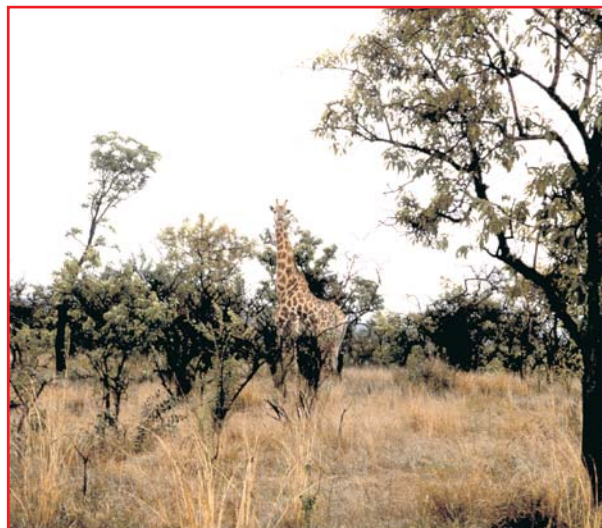
Les précipitations atteignent jusqu'à 1 250 mm par an. L'humidité relative est de 20 à 55 % pendant la saison sèche et approche des 95 % pendant la saison des pluies.

Les vents sont constants et forts pendant toute l'année, mais se modèrent vers la fin de la saison sèche.

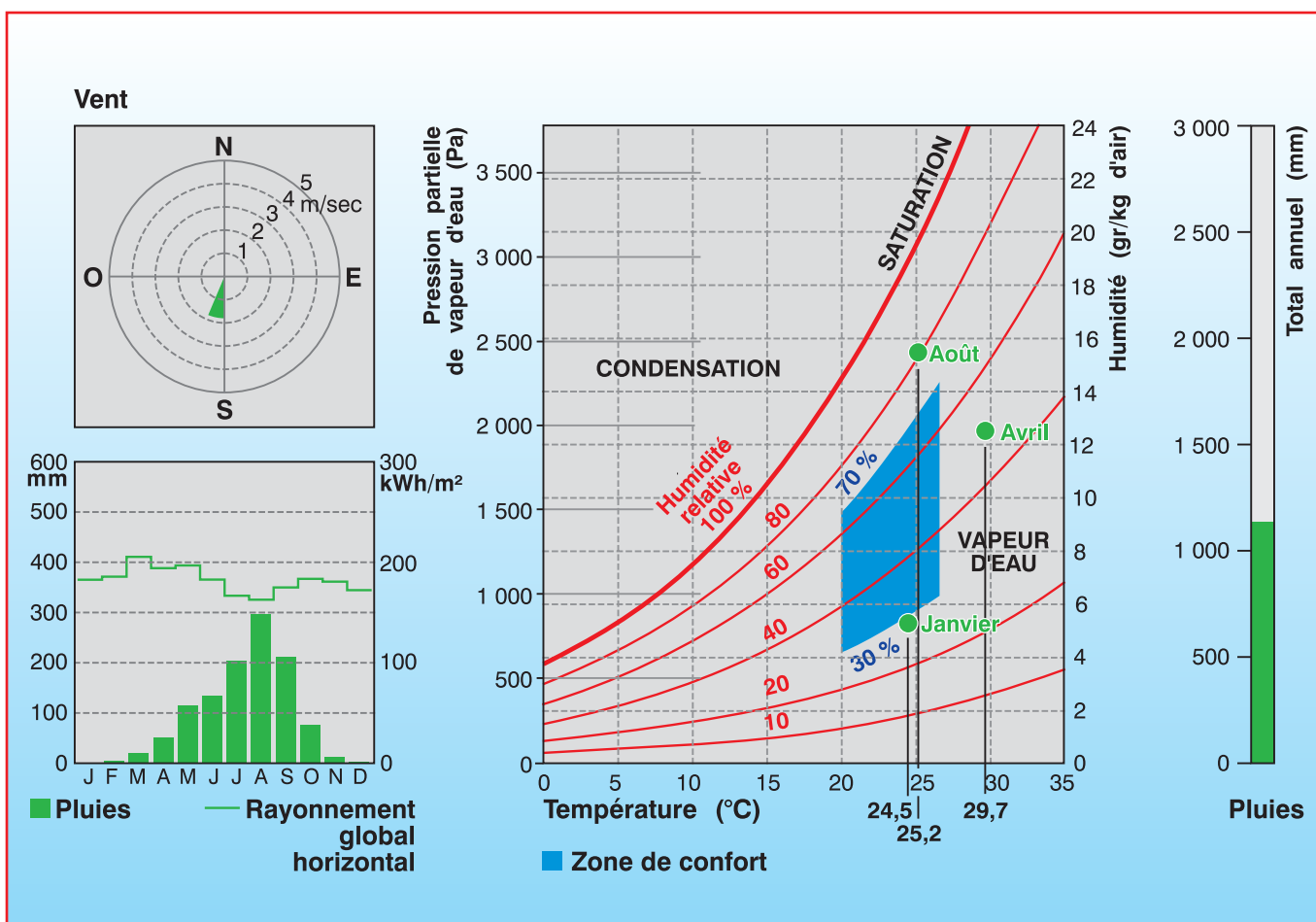
La brousse, la steppe et la prairie font partie des paysages de la savane sèche. Cette zone forme une transition entre la zone humide boisée et la zone sèche aride, la végétation rencontrée y est variée. Le paysage est luxuriant pendant la saison des pluies. En saison sèche, il se compose d'herbes sèches, d'arbres sans feuilles et d'arbustes.

Comme l'indique la fiche climatique de la ville de Bamako, les températures sont au-dessus du niveau de confort en saison très chaude. L'humidité relative est trop importante pendant la saison des pluies et insuffisante en saison sèche. Cette variation saisonnière pose des problèmes de dilatation et de retrait au niveau des matériaux de construction.

Le climat tropical sec se caractérise par trois saisons : une saison sèche, une saison de transition et une saison de pluies. L'amplitude thermique diurne est supérieure à 5 °C.



Paysage tropical sec (Afrique du Sud). 1



2 Les caractéristiques du climat de Bamako (Mali). Latitude 12°45' Nord ; altitude 480 m.

Le climat désertique s'étend entre les latitudes 15 et 30 ° principalement au nord de l'équateur. Il englobe les villes de Tamanarasset en Algérie, Assuan en Egypte, Phoenix aux USA, Windhoek en Namibie, Alice Spring au centre de l'Australie, Bagdad en Irak. Ce climat se caractérise par deux saisons plus ou moins marquées, à savoir une saison chaude et une saison froide.

Durant la période chaude, les températures atteignent rapidement après le lever du soleil 43 à 49 °C pour redescendre à 30 °C, voire jusqu'à 24 °C la nuit. En période froide, les températures oscillent entre 27 et 32 °C le jour et de 10 à 18 °C la nuit. Les écarts de températures entre le jour et la nuit sont très importants. L'amplitude annuelle est de l'ordre de 11 à 17 °C.

Les précipitations sont irrégulières et réparties sur quelques semaines, elles varient de 50 à 250 mm. Certaines années, il ne pleut pas dans le désert; d'autres années, des pluies intensives causent des dégâts importants. L'humidité relative évolue de 10 à 45 %. Les variations journalières de l'humidité peuvent atteindre 15 %.

Les vents sont chauds et violents. Ils soufflent à dominante ouest, plus forts pendant le jour que la nuit, ils peuvent dégénérer en tempête de sable. Ces vents sont à l'origine de l'érosion et de la formation des dunes.

Le ciel est généralement clair avec une forte intensité lumineuse. Les températures du sol sont supérieures à celles de l'air. La réverbération sur le sable clair est très importante et peut provoquer des éblouissements gênants.

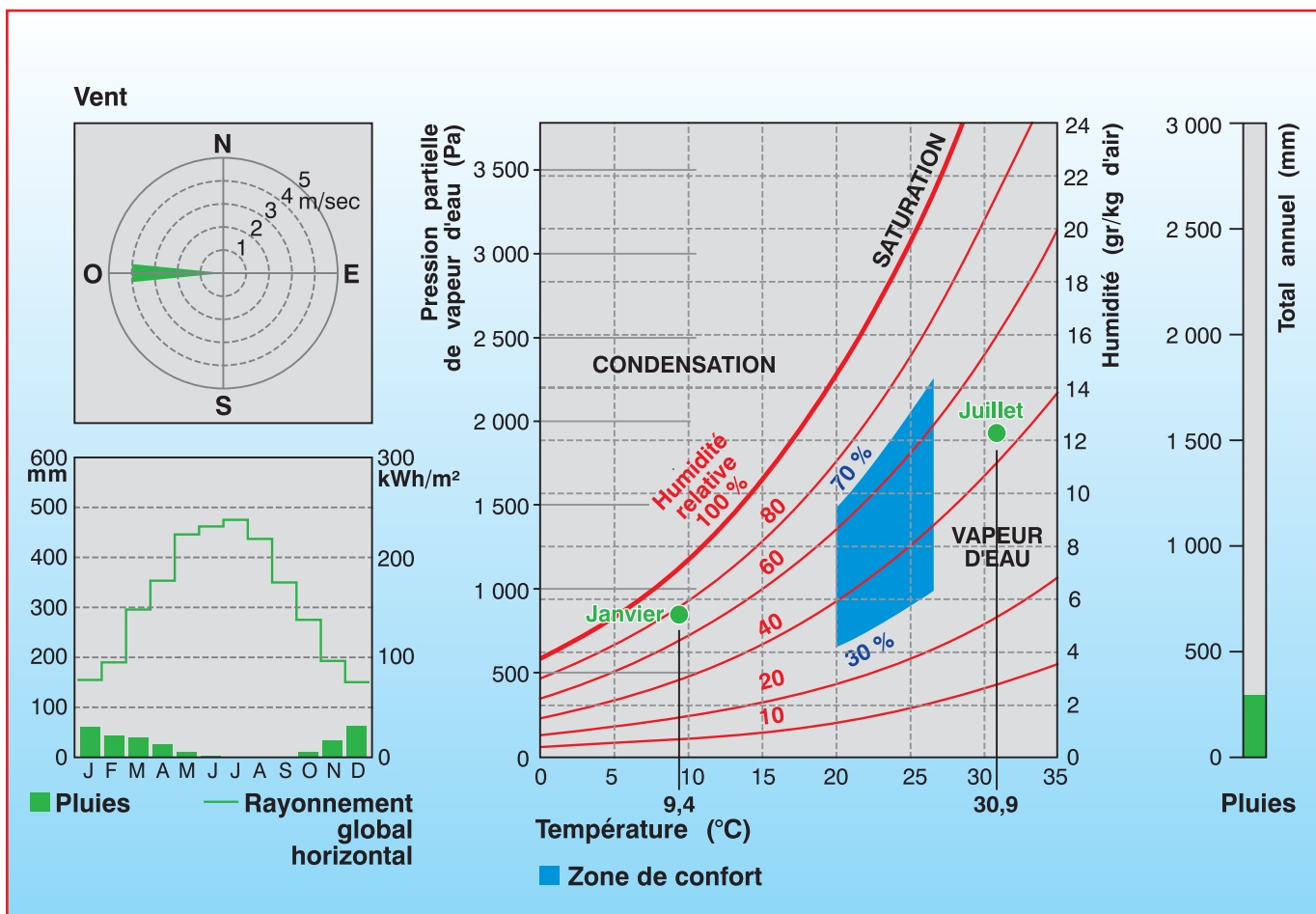
Les pluies étant rares, le sol est aride et sec. Les températures élevées favorisent l'évaporation quasi instantanée de l'eau. La végétation se compose d'herbes et d'arbustes à enracinement superficiel. La courte période de croissance des végétaux ne permet pas d'éviter l'évaporation.

Le diagramme psychrométrique de la fiche de la ville de Bagdad indique que l'on se trouve en dessous de la zone de confort pendant la saison froide et au-dessus au cours de la saison chaude. La construction vernaculaire privilégie les murs à grande inertie thermique. La chaleur emmagasinée le jour est ainsi restituée la nuit. Cette mise en oeuvre permet de pallier aux fortes amplitudes journalières.

Le climat désertique se caractérise par une période chaude et une période froide. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants, les précipitations sont rares.



Paysage désertique (Sahel). 1



2 Les caractéristiques du climat de Bagdad (Irak). Latitude 33°14' Nord ; altitude 33 m.

La situation d'altitude engendre des modifications climatiques. Les températures s'abaissent et les amplitudes thermiques journalières s'intensifient. La fiche climatique de Nairobi présente un climat très différent du climat équatorial malgré la position de cette ville sur l'équateur.

Les températures s'échelonnent de 10 à 29 °C. La variation annuelle de la température moyenne mensuelle est de 4 °C. Les écarts entre la température diurne et nocturne s'élèvent jusqu'à 14 °C. Cette amplitude est plus importante que celle d'une région située à la même latitude mais à une altitude plus faible. Les températures diurnes dépassent à peine la limite de confort. Les nuits sont confortables, parfois même fraîches.

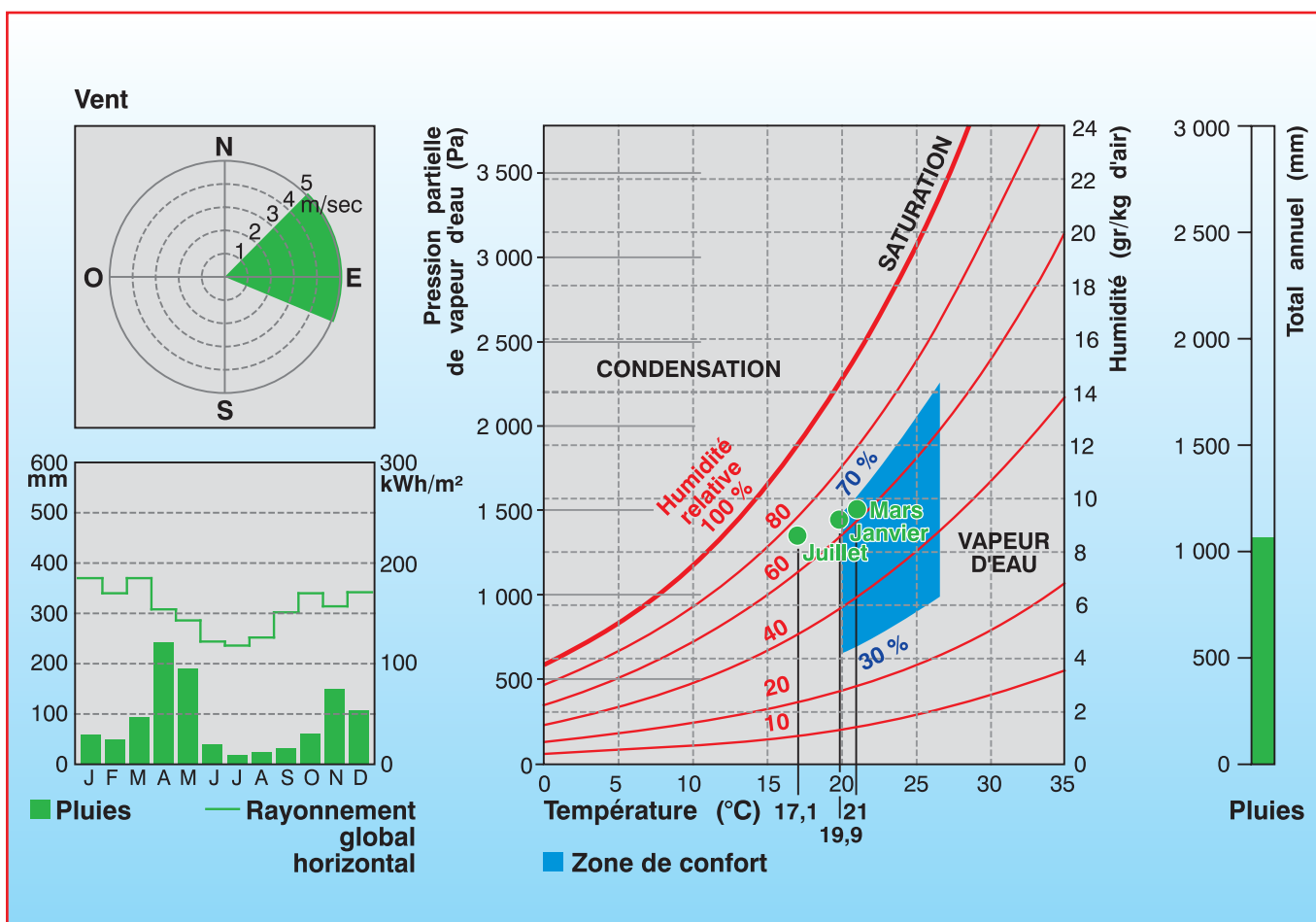
Le niveau moyen annuel des précipitations est de 1 000 mm. La période de juin à septembre est relativement sèche, les mois de mai à avril sont pluvieux. L'humidité relative est uniforme et constante. Le vent est faible de mai à août, et souffle davantage le reste de l'année.

Le diagramme psychrométrique indique une humidité relative importante qui ne dépasse pas les limites de confort. Les températures sont inférieures aux limites de confort durant une courte période de l'année. Malgré leur position commune sur l'équateur, le climat de Nairobi est plus agréable que celui de Belem. Cependant, les bâtiments doivent permettre une grande inertie afin de remédier aux écarts journaliers de températures. Ceci, afin de pouvoir emmagasiner une certaine fraîcheur la nuit et de la restituer au cours de la journée, et vice-versa.

Le climat chaud d'altitude est comparable au régime climatique de la zone correspondante. Cependant les températures et les précipitations s'abaissent avec l'altitude.



Région montagneuse (Laos). 1



2 Les caractéristiques du climat de Nairobi (Kenya). Latitude -1°16' Sud ; altitude 1 820 m.

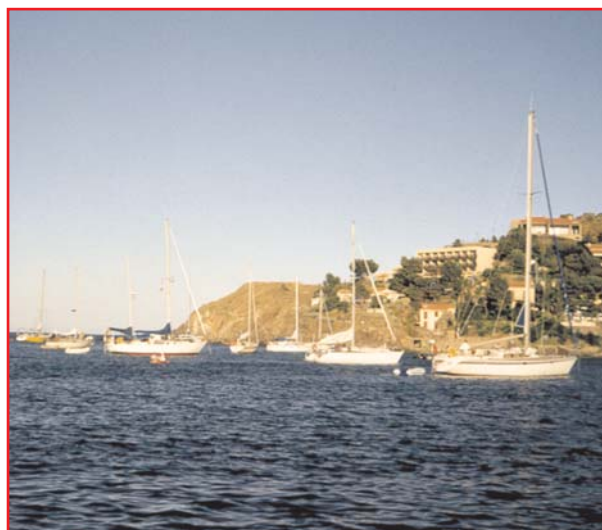
Le climat méditerranéen s'étend des latitudes 30 à 40 ° au nord de l'équateur. Il englobe la ville de Tunis, et tout le bassin du golfe méditerranéen. Cette zone connaît deux saisons : un été chaud, voire très chaud et un hiver court tempéré à froid.

En été, la région subit l'influence du vent chaud et sec du Sahara. Les températures moyennes maximales varient de 25 à 38 °C le jour et de 16 à 30 °C la nuit. L'amplitude thermique diurne est relativement forte mais plus faible qu'à l'intérieur des terres. En saison chaude, l'humidité relative est élevée, de 70 à 80 %. Les vents locaux sont faibles, pendant les grosses chaleurs, la brise de mer joue un rôle régulateur et rafraîchissant. A certaines heures de la journée, un vent du sud-est très chaud et sec, le "sirocco", circule avec sifflements, et envoi du sable du désert jusqu'au littoral méditerranéen. Le ciel dégagé permet des rayonnements solaires intenses.

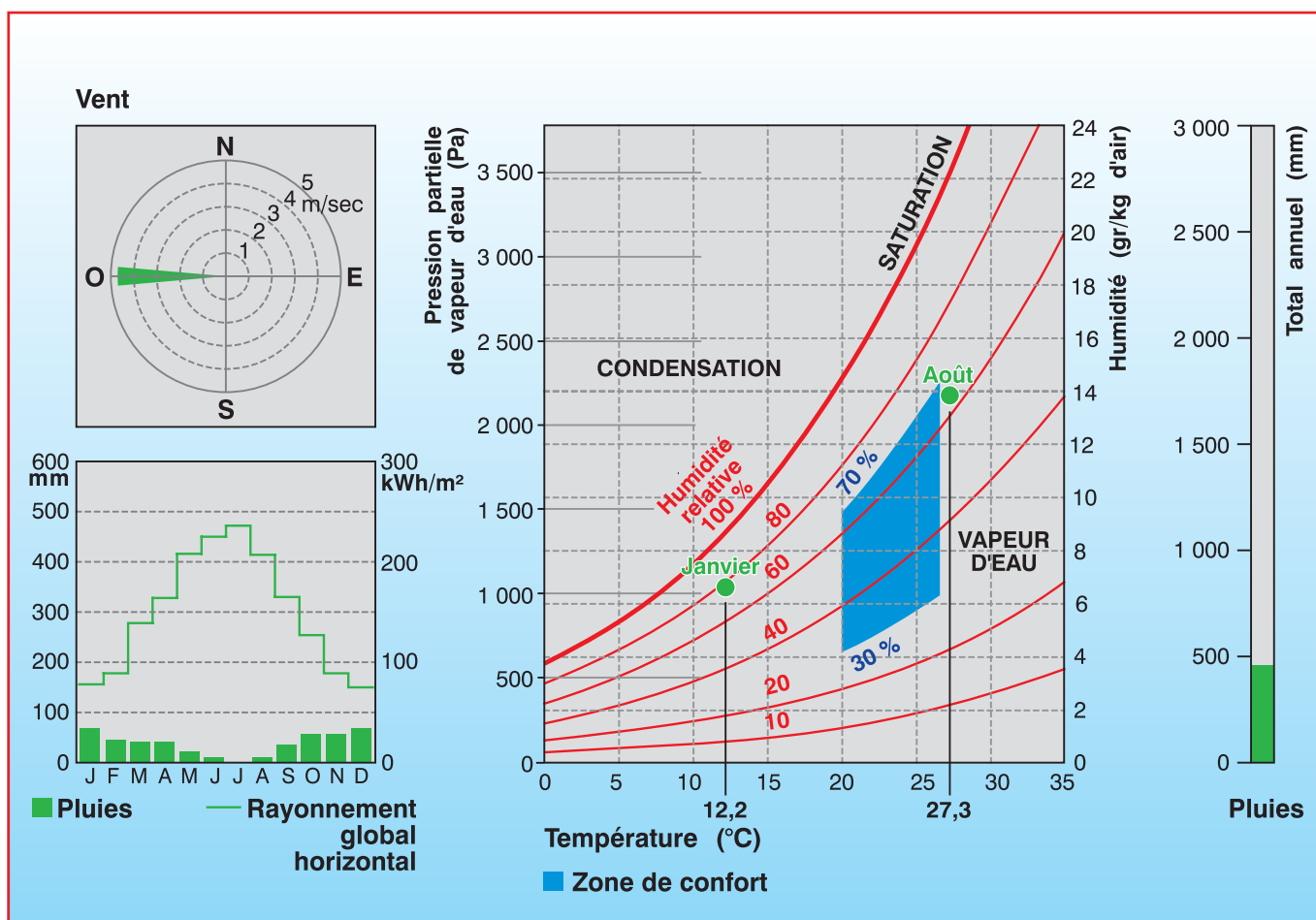
En hiver, les masses d'air d'origine polaire envahissent le bassin méditerranéen. La région connaît un passage de perturbations frontales. Les températures moyennes maximales diurnes atteignent 8 à 21 °C et les températures moyennes minimales nocturnes varient de 0 à 18 °C. L'amplitude thermique est faible. Les précipitations s'élèvent jusqu'à 500 mm. L'humidité relative, de 60 à 70 %, est importante, mais moins élevée qu'en été. Les vents sont variables.

Le diagramme psychrométrique de la ville de Tunis indique qu'au cours des mois d'hiver, les températures sont en dessous de la zone de confort. Un système de chauffage est alors à prévoir, surtout pour la nuit. A la mi-saison, l'inertie des bâtiments et les apports solaires bien utilisés peuvent ramener les températures dans les zones de confort. Durant l'été, les moyennes de température se situent dans la zone de confort. L'inertie thermique présente alors des qualités qui atténuent les fluctuations journalières des températures. Une bonne conception de ventilation permet d'éviter l'emploi du conditionnement d'air.

Le climat méditerranéen se caractérise par deux saisons : un hiver tempéré à froid, et un été chaud à très chaud. Les saisons du climat maritime sont plus homogènes que celles du climat continental.



Paysage méditerranéen (France). 1



2 Les caractéristiques du climat de Tunis (Tunisie). Latitude 36° Nord ; altitude 5 m.

Une grande partie de l'énergie rayonnée par le soleil est absorbée par l'atmosphère et principalement par le sol. Certaines régions sont mieux exposées que d'autres. Or tout corps échauffé en un point tend à répartir dans toute sa masse la chaleur reçue. Le sol étant mauvais conducteur, l'équilibre thermique ne peut se faire par conduction. Les échanges thermiques se font essentiellement par mouvements de masses (air et eau). Cette redistribution de l'énergie génère des vents qui soufflent toujours d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression.

En région équatoriale, la rencontre des masses d'air oblige l'air chaud, plus léger, à s'élever. Dans la troposphère, l'air des zones froides s'alourdit et s'affaisse dans les latitudes 30 °. Cette boucle de circulation est appelée "Cellule directe de Hadley". Il se forme au niveau de la ceinture équatoriale une zone de basse pression. Au niveau des tropiques, une zone de haute pression engendre les vents alizés. Ces vents subissent l'influence de la rotation de la terre et sont déviés à droite dans l'hémisphère nord et à gauche dans l'hémisphère sud par les forces engendrées par le mouvement de rotation de la terre, appelées "force de Coriolis".

En région polaire, l'air froid et lourd diverge du sol vers les latitudes tempérées. En altitude, la convergence vers les pôles boucle la circulation en une "Cellule directe polaire".

La cellule indirecte des latitudes subtropicales et tempérées ("Cellule de Ferrel") est dirigée par les deux autres vers les latitudes 60 °. Au sol, la rencontre des masses d'air polaire et d'air tropical forme le front polaire. L'air chaud s'élève en pente douce au-dessus de l'air froid. Ce vent ascendant est ensuite dévié par la "force de Coriolis".

A ces facteurs globaux de distribution, s'ajoutent des facteurs locaux : la topographie des lieux, l'altitude, le rapport des surfaces d'eau et de terre, l'albédo et la rugosité du sol.

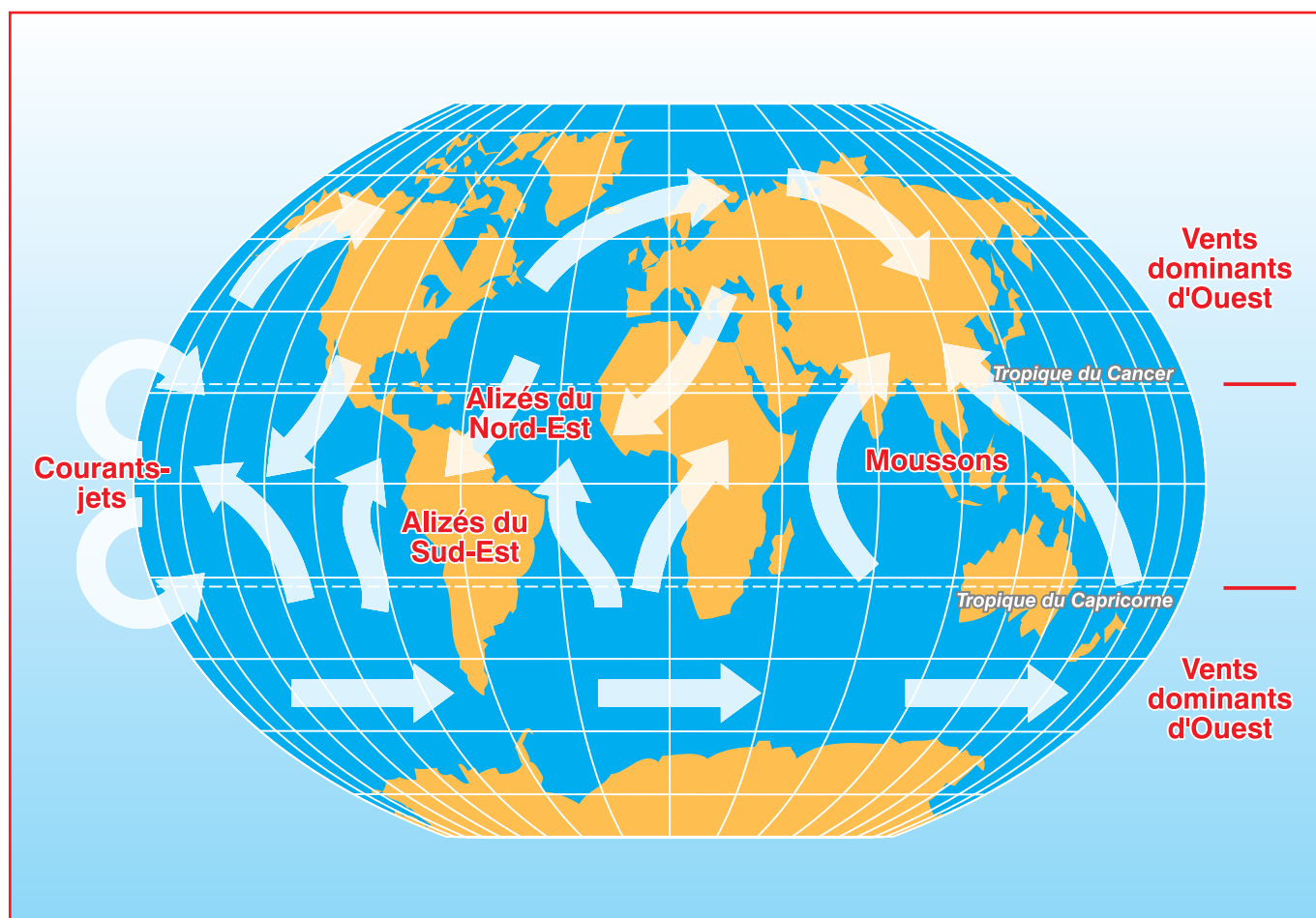
Les vents de mousson résultent du déséquilibre terrestre et maritime entre les deux hémisphères. En été, le sol se réchauffant plus vite que les océans, une zone de basse pression se forme au-dessus du continent et une zone de haute pression au-dessus des océans. Les vents soufflent alors de l'océan vers le continent. Ce phénomène s'inverse en hiver.

La haute atmosphère est régulièrement traversée par des courants-jets se déplaçant à 200 km/h vers l'Est. Par périodes, ces courants atteignent une vitesse de 400 km/h et rencontrent les vents de la basse atmosphère. Des tourbillons agitent alors ces jets et les font onduler. A basse altitude, des dépressions de surface se créent par rencontre d'un front d'air chaud avec un front d'air froid. Les tourbillons de haute altitude et les dépressions de surface se renforcent mutuellement. Si cette configuration se maintient durablement, une tempête naît et croît au fur et à mesure de son avancée. Si les deux éléments se séparent, elle s'éteint.

Les masses d'air se déplacent des zones froides de haute pression vers les zones chaudes de basse pression. Ces flux sont déviés par la force de Coriolis résultant de la rotation de la Terre.



Le phénomène de tempête se crée dans diverses zones du globe. 1



2 Régime des vents à la surface de la Terre.

Le soleil rayonne son énergie vers la terre. Cette énergie dépend de la puissance du soleil et de sa position par rapport à notre planète. Le soleil a une température de l'ordre de 6 000 K. Il émet l'essentiel de son énergie par de courtes longueurs d'ondes, dans le domaine du visible et du proche infrarouge. Environ un tiers du rayonnement solaire incident est réfléchi vers l'espace par l'atmosphère, les nuages nous protègent ainsi d'une surchauffe. Le sol réfléchit également une partie du rayonnement incident. Cette part est liée au coefficient de réflexion du sol, appelé "albédo". Le reste, soit environ 240 W/m², est absorbé et transformé en chaleur par l'atmosphère, les océans ou les surfaces continentales. Les ultraviolets sont absorbés par l'ozone de la stratosphère, les infrarouges par les vapeurs d'eau et le gaz carbonique de la troposphère. Seul le rayonnement visible et le proche infrarouge atteignent la surface du sol. En respect des principes d'équilibre thermodynamique, la terre émet en retour vers l'espace une énergie en moyenne égale à celle qu'elle a absorbé, soit 240 W/m².

Le bilan radiatif de la terre est la différence entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge émis par la terre. Ce bilan s'équilibre de façon globale, mais pas à l'échelle régionale. On peut remarquer un bilan radiatif positif à l'équateur et un bilan radiatif négatif aux pôles.

Au cours de la nuit, le sol, n'étant plus soumis à la radiation du soleil, libère une partie de la chaleur emmagasinée le jour par rayonnement vers le ciel. Lorsque le ciel est couvert, le refroidissement du sol est plus faible car limité par les nuages. Ce qui explique qu'en climat humide, l'amplitude thermique entre le jour et la nuit soit moins importante qu'en climat sec.

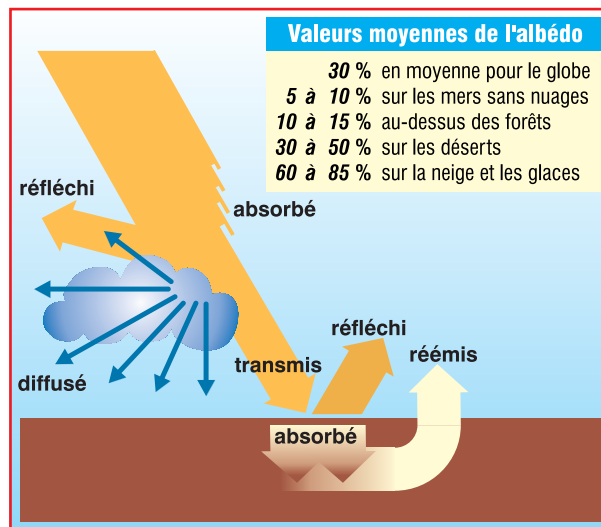
Aujourd'hui, le bilan radiatif global de la terre ne s'équilibre plus. En effet, l'activité de l'homme modifie la composition chimique de l'atmosphère. Des gaz, tels que le CO₂, CH₄, N₂O, participent à une augmentation de l'effet de serre. Leurs bandes d'absorption significative dans les infrarouges thermiques diminuent ainsi le rayonnement vers l'espace et l'équilibre des flux thermiques. Ce déséquilibre se traduit par des modifications de distribution nuageuse ou des changements dans les gradients thermiques.

Le rayonnement thermique terrestre permet de prévoir l'amplitude et l'évolution des anomalies climatiques à grande échelle. L'étude du rayonnement permet d'évaluer la façon dont le climat réagit ou pourrait réagir aux perturbations naturelles (volcanisme) ou anthropiques (augmentation des gaz à effet de serre ou des aérosols).

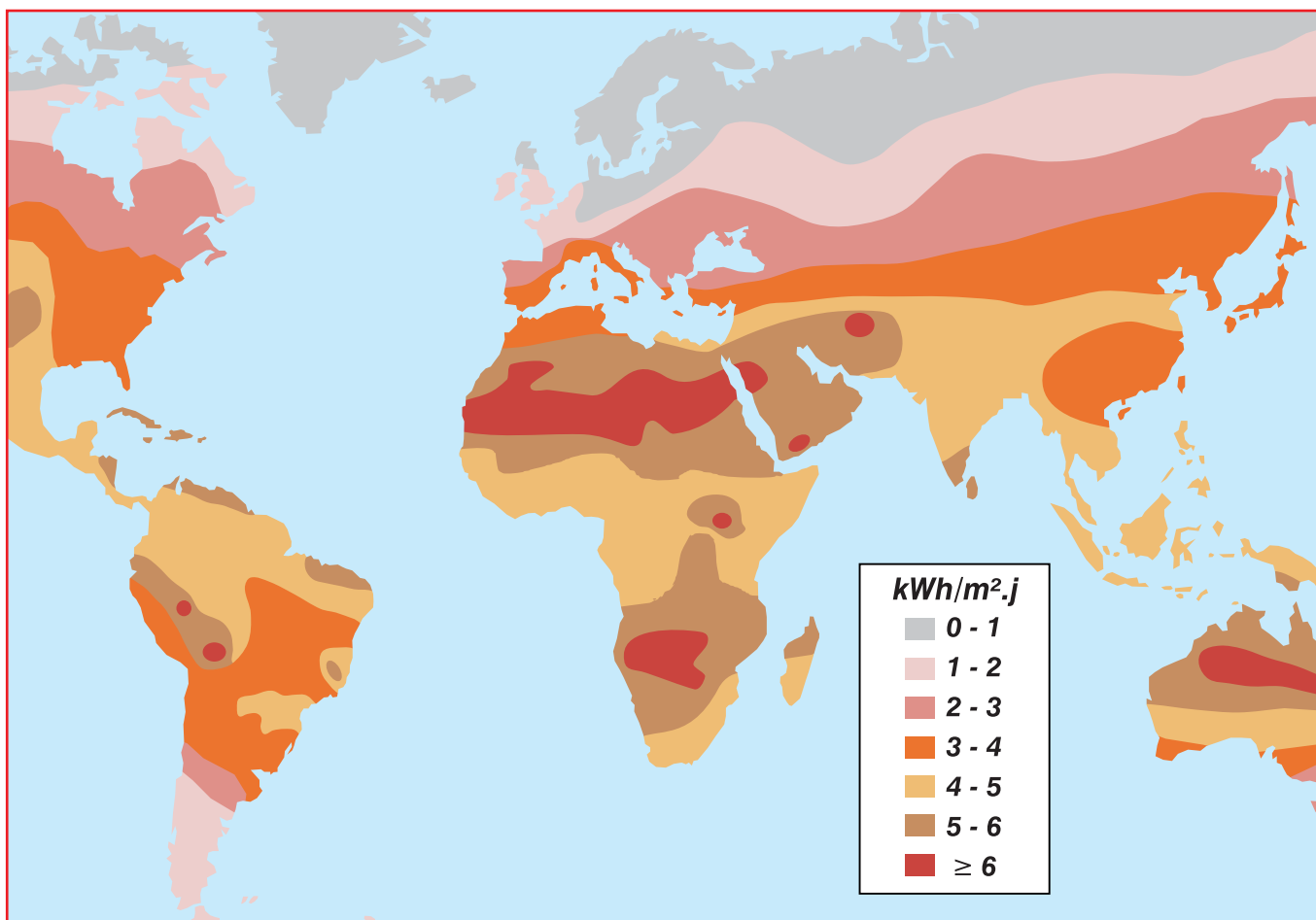
CONSTRUIRE EN CLIMAT CHAUD
Les climats chauds et leurs contextes

Le rayonnement thermique terrestre

Le rayonnement solaire global se décompose en un rayonnement direct issu du soleil, un rayonnement diffusé par les nuages, et un rayonnement réfléchi par l'environnement appelé albédo.



Bilan radiatif terrestre. 1



2 Rayonnement solaire à la surface du globe.

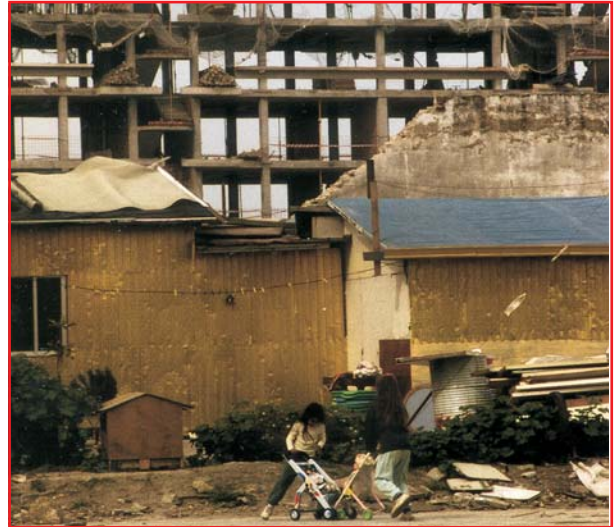
L'approche socio-économique du développement est traitée dans de nombreux travaux de recherche. Il s'agit généralement d'études de cas où la théorisation se fait plus par comparaison entre thématiques que par insertion dans une problématique globale. Ces analyses déclinent des contextes sociaux et économiques tendus. Sur le terrain, de nombreuses contradictions portent sur l'exode rural, les politiques publiques, les besoins en logement, l'aménagement, la planification des quartiers périphériques, les transports, le commerce et le traitement de l'eau.

Un grand nombre de pays sous les climats chauds restent dépourvus face à l'évolution des termes de l'échange (Nord-Sud). Les disparités sociales sont nombreuses et les problèmes liés à la dégradation de l'environnement, préoccupants. Ces pays sont maintenus dans des rapports de dépendance entre périphéries et centres décideurs, financiers et technologiques. Cette constante pèse sur les politiques d'ajustement, les réformes urbaines ou rurales et le rôle des Etats.

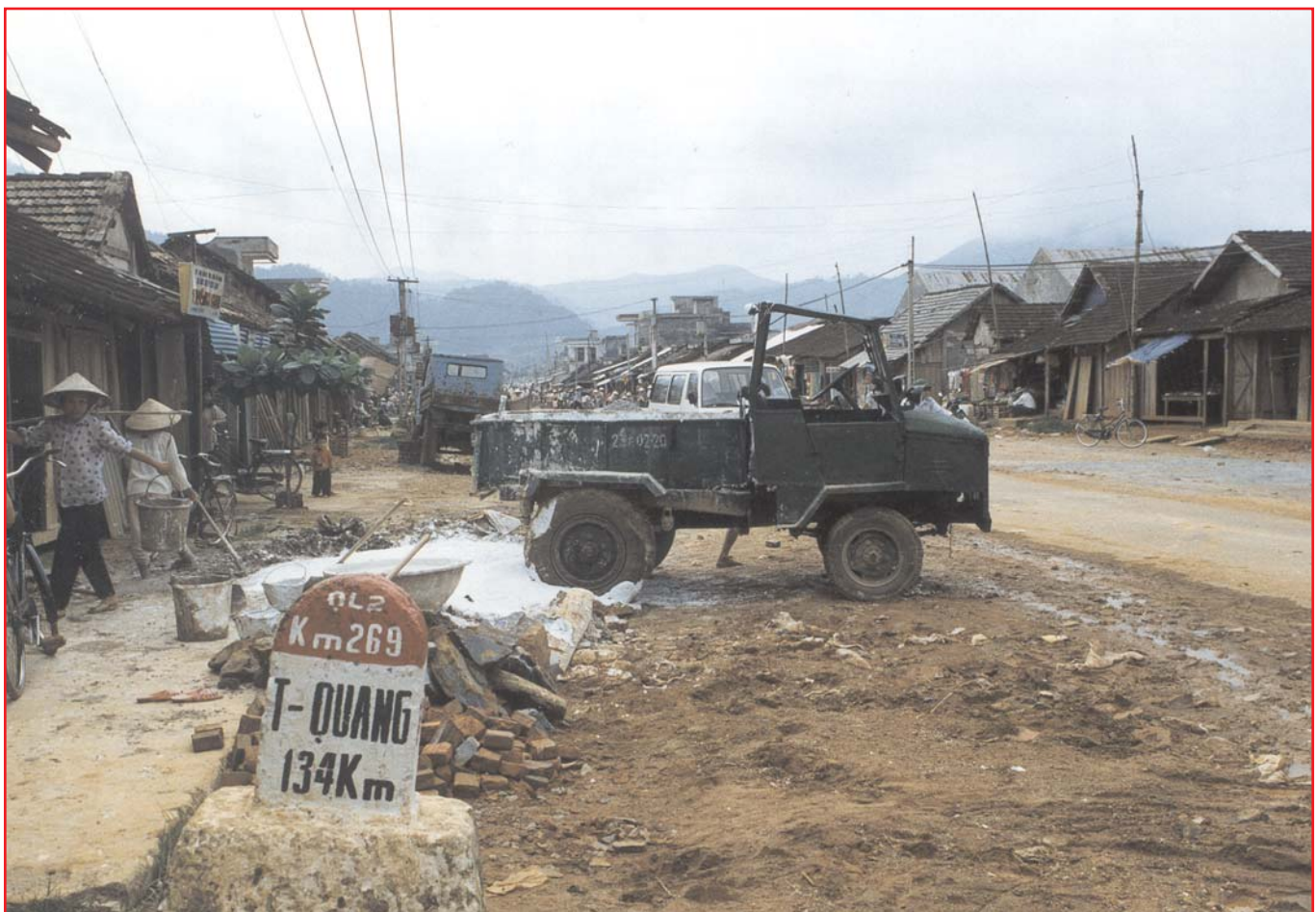
Au niveau de l'architecture et de l'urbanisme, les concepteurs de l'habitat doivent répondre à des problématiques d'habitat insalubre non maîtrisables par les autorités. L'irrégularité dans laquelle vivent de nombreux ménages prend diverses formes. La dégradation du cadre bâti est fréquente. Ces dernières années, la situation a eu tendance à s'aggraver, faute de politiques cohérentes ou de leurs mises en œuvre effectives. L'analyse des potentialités existantes sur un plan juridique et institutionnel permet de procéder, lors d'une construction, à la régularisation de l'occupation des terrains. L'identification des ressources locales offre des possibilités de mise en œuvre dans les opérations. L'analyse des conditions de reproductibilité des expériences de régularisation rend possible la prévention de l'accroissement du nombre de situations irrégulières.

Une attention particulière vise à rendre acceptables les opérations de régularisation pour les catégories qui y sont, localement, les plus opposées. L'impact de ces opérations s'avère, dans bien des cas, encourageant.

Dans des contextes socio-économiques exacerbés, de nombreuses villes souffrent d'une pénurie de logements, d'équipements de base, de services, d'énergie, d'eau...



Habitat insalubre et chantier de construction à Séville (Espagne). **1**



2 Rue principale de Ha Giang (Vietnam).

L'accès aux énergies est une problématique souvent oubliée lorsqu'on évolue dans un environnement très développé. Dans beaucoup de pays, principalement dans la zone de la ceinture équatoriale africaine, la population n'a pas accès à l'électricité. Sans électricité, les activités humaines et industrielles sont ralenties de la tombée de la nuit au lever du jour.

De nombreux quartiers, plus ou moins insalubres, des zones périphériques, des grandes agglomérations s'organisent sans l'accès à l'électricité d'un réseau. Les réseaux installés sont souvent impossibles à gérer et donc défectueux. Dans ces quartiers à grande densité apparaissent de nombreux problèmes d'hygiène, de sécurité et de tensions sociales. L'accès à l'énergie constitue un enjeu majeur de la problématique de développement de l'habitat en climat chaud. En effet, il est l'un des freins majeurs à l'exode rural. Dans différents contextes sociaux, la population est alors moins encline à rejoindre les agglomérations.

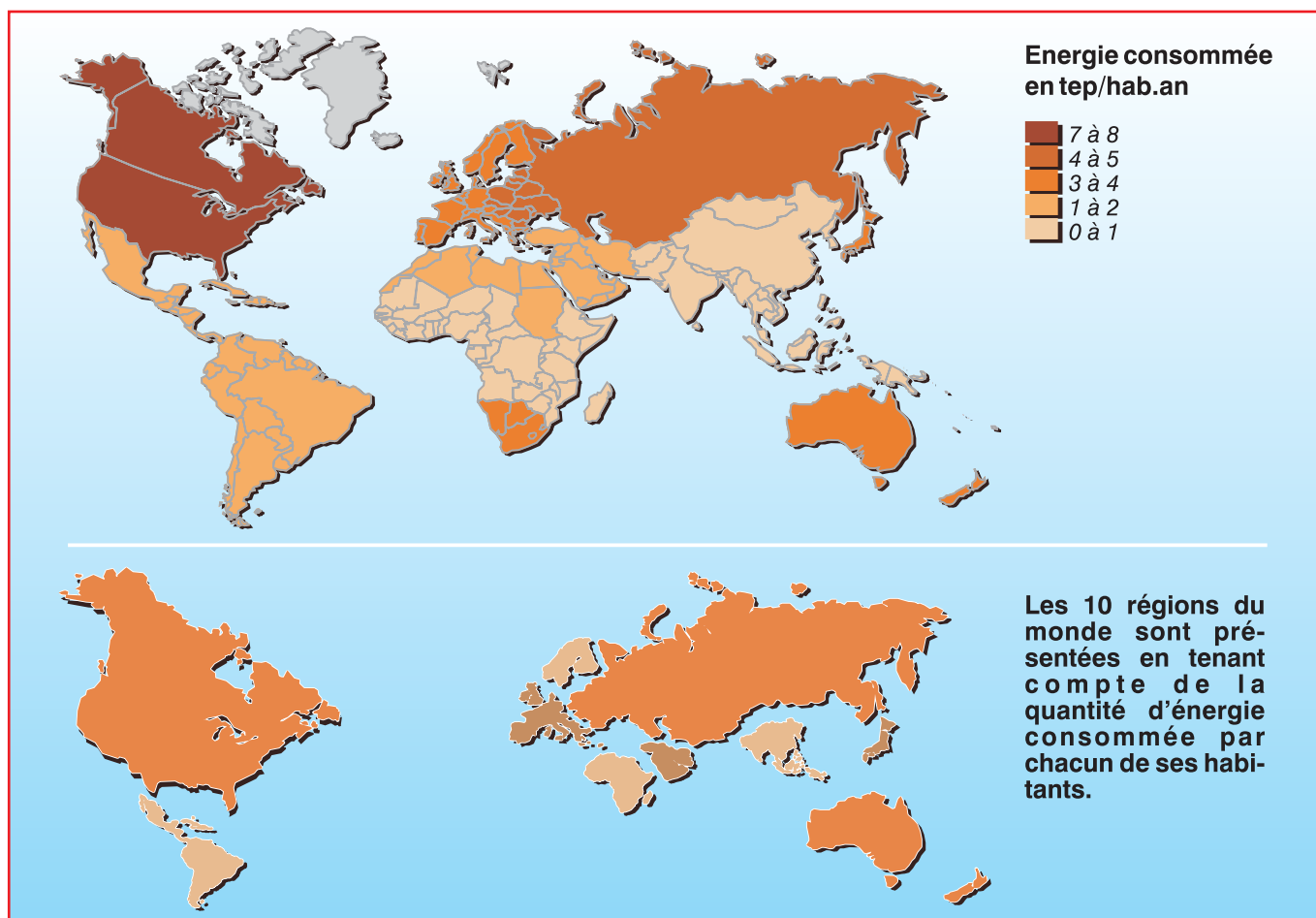
Aussi, il est difficile de penser au recours à un système de climatisation électrique pour atteindre les niveaux de confort thermique. Les bâtiments qui intègrent un tel système doivent être équipés de groupes électrogènes, avec les coûts que cela engendre. Seules de grandes sociétés peuvent se permettre de telles mises en œuvre, ce qui creuse un peu plus l'écart avec les habitants qui ne peuvent pas recourir à ces systèmes onéreux.

La carte du schéma 2 de la fiche représente le déséquilibre des consommations énergétiques entre le nord et le sud du globe.

**Dans certains pays,
une partie de la
population n'a pas accès
aux énergies.
Sans électricité, pas
d'éclairage performant,
l'activité des habitants
s'arrête à la tombée
de la nuit.**



Habitants d'une zone rurale décentralisée (Vietnam). **1**



2 La consommation d'énergie s'échelonne de 7,9 tep/hab.an en Amérique du Nord à 0,3 tep/hab.an en Inde (Enerdata - 1990).

Il est important d'intégrer dans une démarche urbanistique et architecturale le souci d'adaptation aux modes de vie et aux cultures locales.

Certaines dispositions spatiales se retrouvent d'un environnement culturel à l'autre. Par exemple, dans de nombreuses régions chaudes et humides :

- une véranda offre de larges espaces ouverts à tous vents. C'est un lieu où s'effectuent les travaux ménagers, les siestes ou encore les repas. Cet espace a l'usage d'un séjour familial prolongé ;
- une partie du jardin dispose d'un coin cuisson, qui permet de limiter les apports internes de chaleur dans la maison. La cuisine est alors libérée de son utilisation première et vouée à une fonction de garde-manger ;
- une courette sur l'arrière de la maison crée une séparation avec la voie de circulation publique.

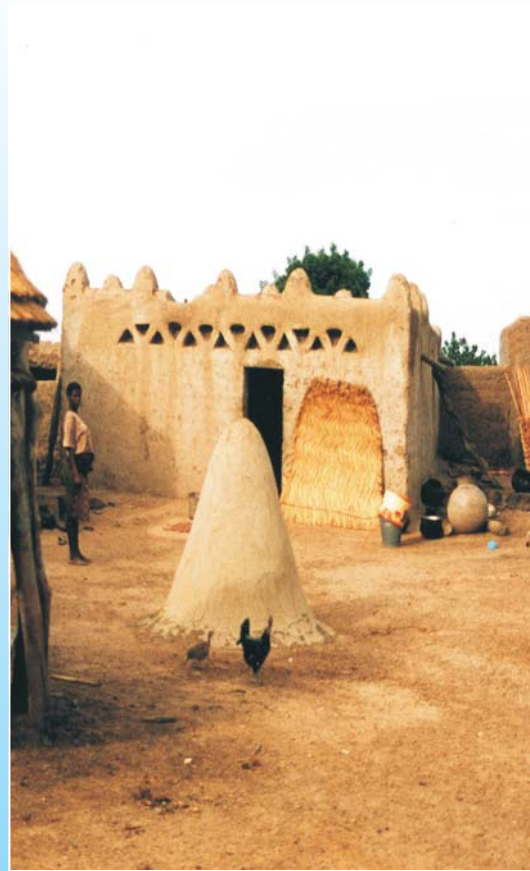
L'adaptation de l'habitat ne s'arrête pas à la pertinence de l'usage qui en est fait. Elle concerne aussi la valorisation des ressources locales : main d'œuvre, savoir-faire, matériaux de construction. La valorisation des ressources locales est essentielle en termes de développement. Elle exige une connaissance approfondie du contexte dans lequel est conçu le bâtiment. Cette mise en œuvre soulève la question de l'aspect qualitatif de la construction et celle du coût. Le recours à des produits industriels importés peut participer à une homogénéisation des performances attendues. Cependant, les produits standardisés ne valorisent pas la situation socio-économique du lieu de construction, impliquant des importations massives, une réduction de la valeur ajoutée locale, une déqualification des métiers traditionnels. Dans un souci de développement, il convient de convoquer le savoir-faire local et les produits locaux afin de minimiser le coût des importations et de revaloriser les valeurs culturelles.

L'implication et la valorisation de la main d'œuvre locale enrichissent le vocabulaire architectural et réduisent la banalisation de standards occidentaux peu adaptables. Le développement d'un savoir-faire propre aux régions induit également l'appropriation symbolique de dispositifs architecturaux par les habitants. Cette thématique s'inscrit dans l'élaboration d'une politique générale de développement durable.

La conception climatique d'un bâtiment se doit d'intégrer les valeurs culturelles des habitants, de valoriser les savoir-faire locaux, et d'utiliser les ressources régionales.



1 Production de briques de terre crue séchées au soleil (Madagascar).



2

Villages traditionnels (Vietnam) - (Mali).

Le confort thermique définit des plages de températures, de vitesse d'écoulement d'air et des niveaux d'humidité dans lesquelles les habitants ne ressentent pas d'inconfort. Il est essentiellement fonction des échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement.

Ces échanges sont issus des mécanismes suivants :

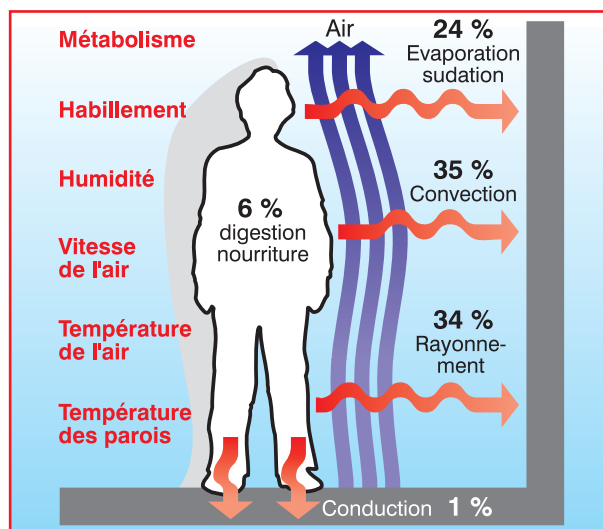
- échauffement ou refroidissement de la peau par convection avec l'air, selon que la température ambiante est supérieure ou inférieure à celle de la peau ;
- refroidissement de la peau par sudation du corps dans l'air ;
- échauffement de la peau par rayonnement direct ou indirect du soleil. Ces rayonnements sont de courte longueur d'onde ;
- échauffement ou refroidissement de la peau par rayonnement des parois, selon que leur température est supérieure ou inférieure à la celle de la peau. Ces rayonnements sont de grande longueur d'onde ;
- la présence de machines ou d'autres personnes dans le local peut être source de chaleur. L'augmentation de la température engendre alors un échauffement de la peau par convection.

En climat chaud et sec, la température de l'air est souvent supérieure à celle de la peau. Il est nécessaire de favoriser des constructions à grande inertie thermique de façon à accumuler de la fraîcheur dans les parois durant la nuit afin de la restituer au cours de la journée. Le faible niveau d'humidité permet le recours à un rafraîchissement de l'air par évaporation d'eau. La présence de végétaux aide à atteindre les exigences de confort.

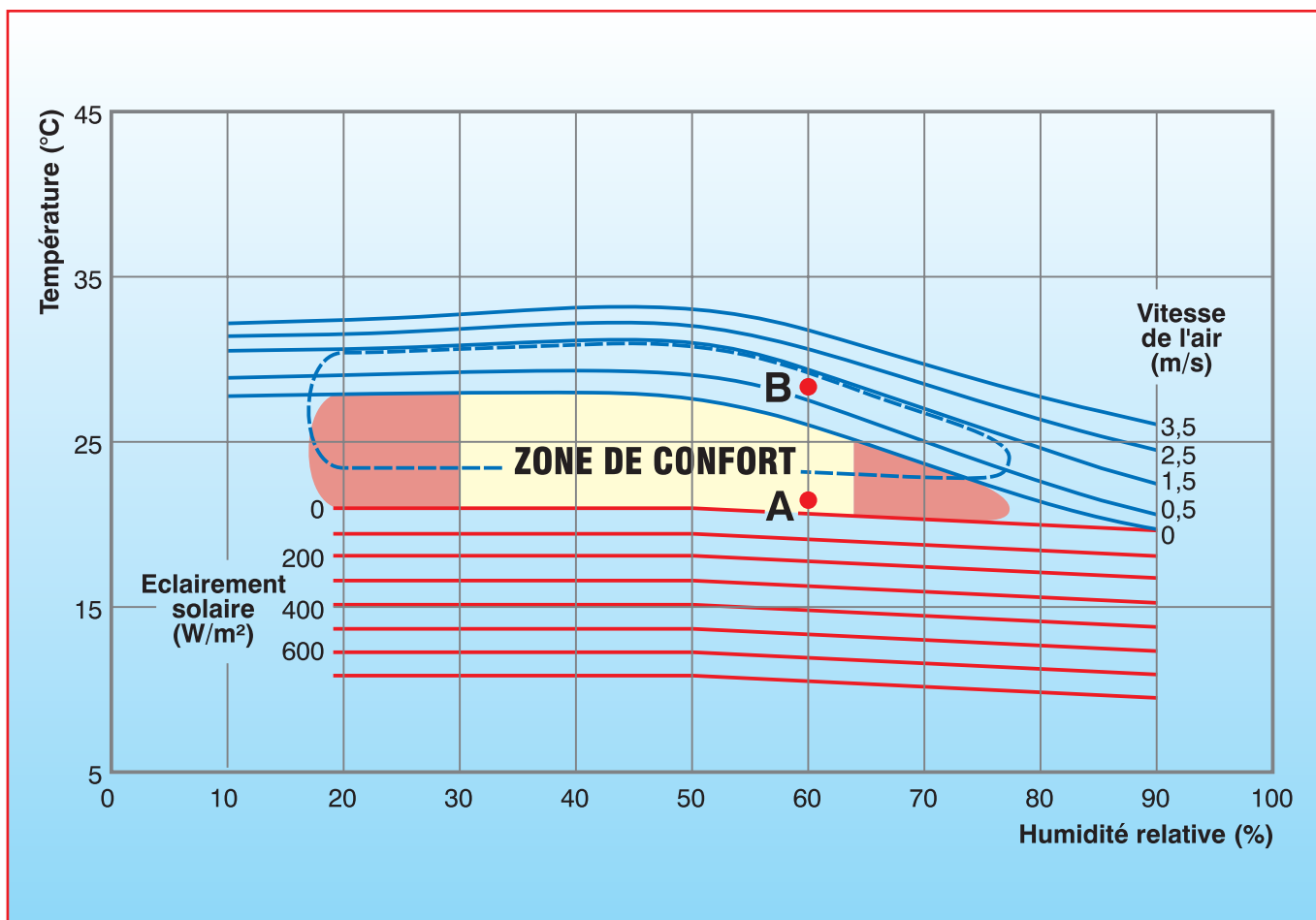
En climat chaud et humide, la température de l'air est régulièrement inférieure à celle de la peau, mais supérieure aux limites de confort. Le taux d'humidité empêche tout refroidissement de l'air par évaporation d'eau. Cette saturation limite également l'évaporation par sudation de la peau. L'un des moyens d'atteindre le niveau de confort technique est d'augmenter la vitesse de l'air. Ceci intensifie les échanges par convection et diminue la température de la peau. L'évaporation par sudation de la peau atténue la sensation de moiteur.

Le schéma 2 de la fiche présente la température de confort en fonction de l'humidité relative et de la vitesse de l'air. Ce schéma indique qu'en climat sec, une température plus élevée qu'en climat humide est acceptable. L'évaporation par sudation de la peau est plus efficace lorsque l'humidité relative est moindre. En augmentant la vitesse de l'air dans une certaine limite, la zone de confort se déplace vers le haut.

La sensation de confort thermique est procurée par l'évacuation de la chaleur du corps. Les mouvements d'air augmentent les pertes de chaleur par convection et facilitent l'évaporation de l'humidité à la surface de la peau.



Les pertes thermiques du corps humain dépendent de 6 paramètres physiques dont la vitesse de l'air. **1**



2 Zones de confort thermique en fonction de la vitesse de l'air (d'après V. Olgyay).

Le confort perçu par les habitants est inclus dans la notion d'ambiance. L'individu à un moment donné capte les perceptions multiples que lui procure son environnement. L'ambiance architecturale ou urbaine concerne des registres variés qui font appel à des paramètres quantifiables ou à des phénomènes subjectifs. Il est notamment question de sentiments, d'émotions ressenties par les usagers autour de formes spatiales et temporelles mais aussi de connaissances subjectives sur des valeurs morales dont tiennent compte les habitants. Chaque culture ou groupe social développe des modes de perception des ambiances selon son expérience sensible.

La thématique du traitement du confort thermique fait valoir en premier lieu des approches objectives de thermique et d'aérodynamique. C'est ensuite le croisement d'un ensemble de phénomènes qui constitue l'impression globale du confort des usagers. Les considérations objectives liées aux usages ne suffisent pas pour rendre compte de l'expérience sensible. En effet, la dimension esthétique, qui évalue l'édifice comme objet d'art et inscrit son usage dans les registres de l'affect et du plaisir, influe elle aussi sur la perception de l'individu.

Le traitement de l'habitat en climats chauds ne gagne pas à se focaliser sur la seule performance énergétique des bâtiments. Il doit intégrer au mieux les champs de la conception architecturale afin de mettre en exergue :

- des réflexions théoriques sur l'analyse multicritère du confort thermique ;
- des questions propres aux processus de conception par la prise en considération des différentes échelles du projet ;
- la demande sociale située en amont par la nécessité de se rapprocher des contextes sociologiques constatés sur le terrain.

Le confort thermique se définit principalement en fonction de paramètres physiques : températures, vitesses du vent, niveaux d'humidité... Cette approche ne se substitue en aucun cas à la question plus globale de l'ambiance architecturale ou urbaine.

**Les sensations
de confort
physiologique
et psychosensoriel
d'un individu relèvent
de phénomènes
objectifs et subjectifs.**



Jardin intérieur à Collioure (France). 1



Phénomènes objectifs

- ✓ 25 °C de température de l'air
- ✓ absence de courant d'air
- ✓ humidité relative de 40 %
- ✓ activité de détente
- ✓ habillement léger
- ✓ soleil du printemps
- ✓ 350 ppm de CO₂
- ✓ éclairage naturel
- ✓ absence d'éblouissement visuel

Phénomènes subjectifs

- ✓ ambiance d'un jardin
- ✓ présence d'un plan d'eau
- ✓ qualité architecturale du lieu
- ✓ protection visuelle du monde extérieur
- ✓ protection acoustique des bruits extérieurs
- ✓ couleurs chaudes
- ✓ odeur des plantes et des fleurs
- ✓ odeur de la cuisine
- ✓ qualité des mets
- ✓ compagnie agréable
- ✓ propreté des lieux

2 Pause-déjeuner dans les jardins de la mosquée Süleymaniye à Istanbul (Turquie).

Le confort visuel est une sensation totalement subjective. Les facteurs significatifs sont, entre autres, l'âge et l'acuité visuelle. Cette sensation de confort dépend également de l'objet à percevoir, de sa taille, de son aspect, de sa couleur. La lumière éclairant l'objet est un facteur essentiel par sa quantité, sa distribution et sa qualité. En découlent l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux.

Les interventions liées aux paramètres du confort visuel sont :

- le niveau d'éclairage de la tâche visuelle ;
- la répartition de la lumière dans l'espace ;
- les rapports de luminance dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets ;
- la vue vers l'extérieur ;
- le rendu des couleurs ;
- la teinte de lumière ;
- l'absence d'éblouissement.

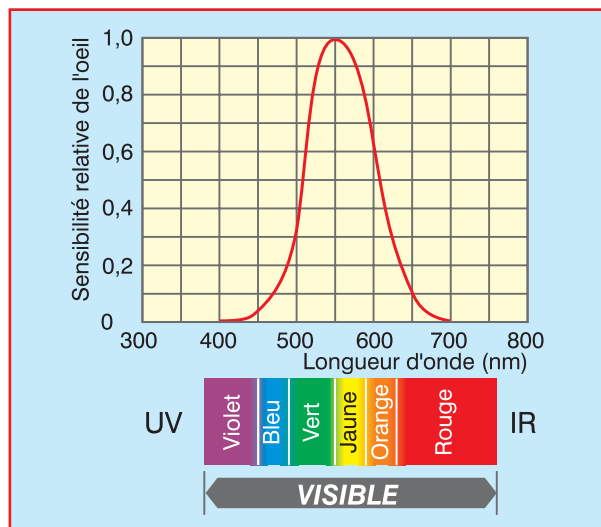
L'éclairage moyen recommandé est lié à la fonctionnalité du local et à la précision de la tâche visuelle qui doit être exercée.

L'utilisation de l'éclairage naturel a un impact sur le bien-être des occupants par rapport à l'éclairage artificiel. La qualité du spectre d'éclairage naturel, sa variabilité dans le temps et ses nuances, sont plus confortables. L'œil humain est mieux adapté à la lumière naturelle qu'à la lumière artificielle.

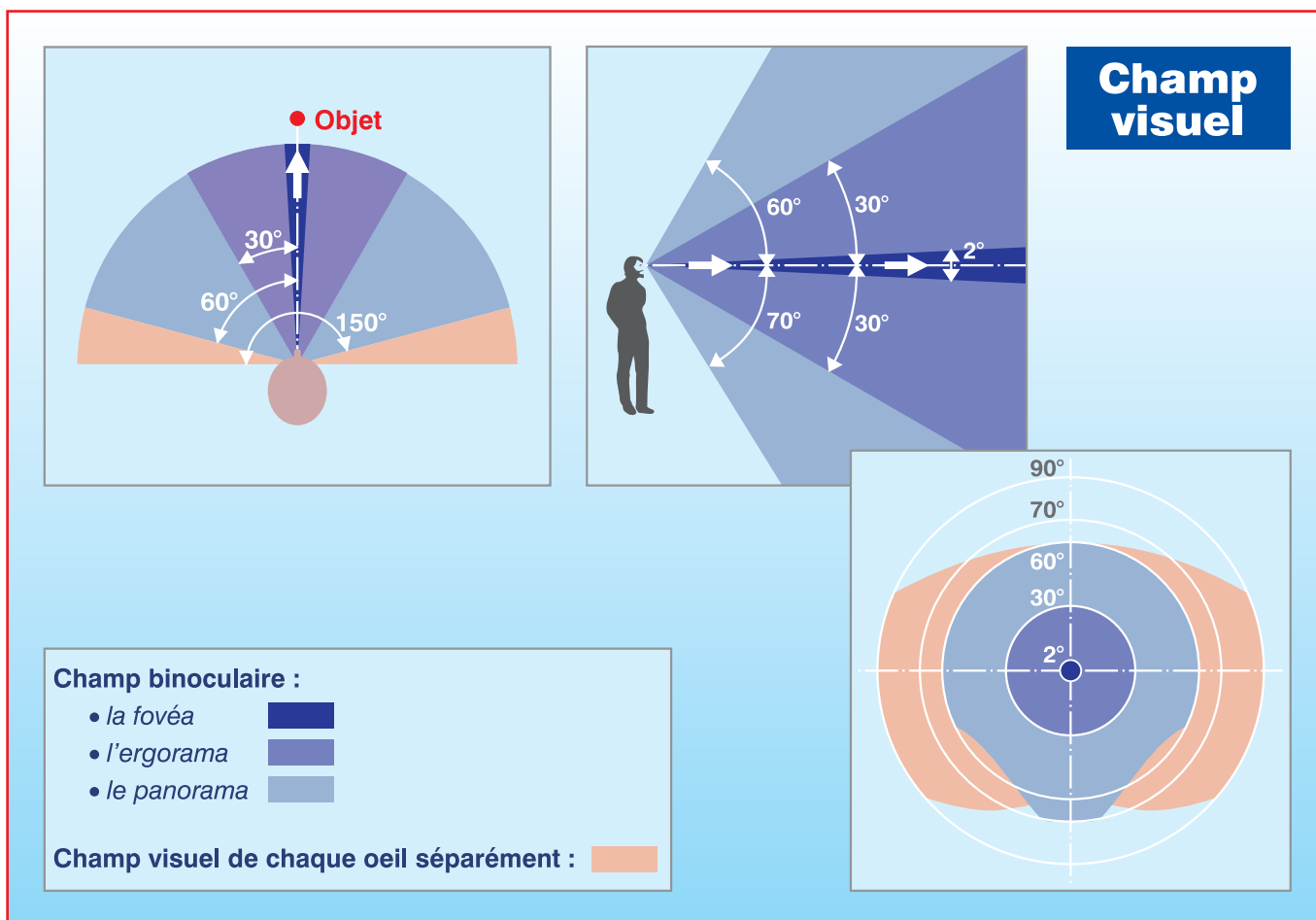
La courbe spectrale de sensibilité de l'œil du diagramme 1 de la fiche nous indique qu'un flux lumineux de couleur bleu foncé ou rouge moyen reçu par une surface doit être d'une puissance environ 10 fois plus importante qu'un flux lumineux de couleur verte ou jaune pour une même sensation de luminosité.

Les détails ne peuvent être perçus que dans un champ visuel assez restreint de 2°, appelé la fovéa. Plus on s'éloigne de ce champ central, plus les détails sont difficilement perceptibles. L'ergonoma, champ visuel de 30° par rapport à l'axe de vue, nous permet de distinguer les formes. Le panorama, champ visuel de 60° par rapport à l'axe de vue, nous permet de distinguer les mouvements. Le champ visuel de chaque œil est de 150° dans le plan horizontal, mais ne se recouvre que sur 120°. Seule la partie recouverte par le champ visuel des deux yeux, permet de distinguer le relief.

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, la distribution, et la qualité de la lumière.



Sensibilité relative de l'oeil par rapport à la longueur d'onde du spectre lumineux. **1**



2 La capacité de l'oeil à saisir une information visuelle dépend de sa position relative dans le champ visuel.

La ventilation naturelle de l'habitat exige de larges ouvertures sur l'extérieur. Cette mise en œuvre permet d'atteindre des niveaux de confort thermique et hygrométrique. Le transport massif de bruits peut être source d'inconfort. Les ouvertures d'un bâtiment s'avèrent illusoire dès lors que l'on se place dans un site bruyant. L'absence totale de bruits extérieurs renforce de façon désagréable les bruits intérieurs. Une gêne acoustique mineure peut devenir souhaitable et "masquer" d'autres bruits beaucoup plus nuisibles.

Les matériaux absorbants apportent des solutions au niveau de l'isolation acoustique. Mais ils posent des problèmes de vieillissement dans les climats humides. Les écrans, les murs, et les obstacles naturels, limitent la propagation des bruits. Ils ne doivent pas en contrepartie limiter les flux de la ventilation naturelle.

Lorsqu'une source sonore se trouve en aval du bâtiment par rapport au sens des vents dominants, la propagation des bruits est diminuée. Lorsqu'elle se trouve en amont, c'est l'inverse. Il est alors important de prendre une certaine distance par rapport à la source du bruit, et de prévoir l'étanchéité du bâtiment sur la façade exposée. Les dispositifs de tours à vent, de protection solaire, d'arrivée d'air en chicanes avec des absorbeurs acoustiques permettent dans certains cas d'atteindre le niveau de confort. Dès la conception, il est important de tenir compte des sources sonores afin de hiérarchiser les pièces par sensibilité et usage.

Quelques directives prennent en compte les nuisances sonores :

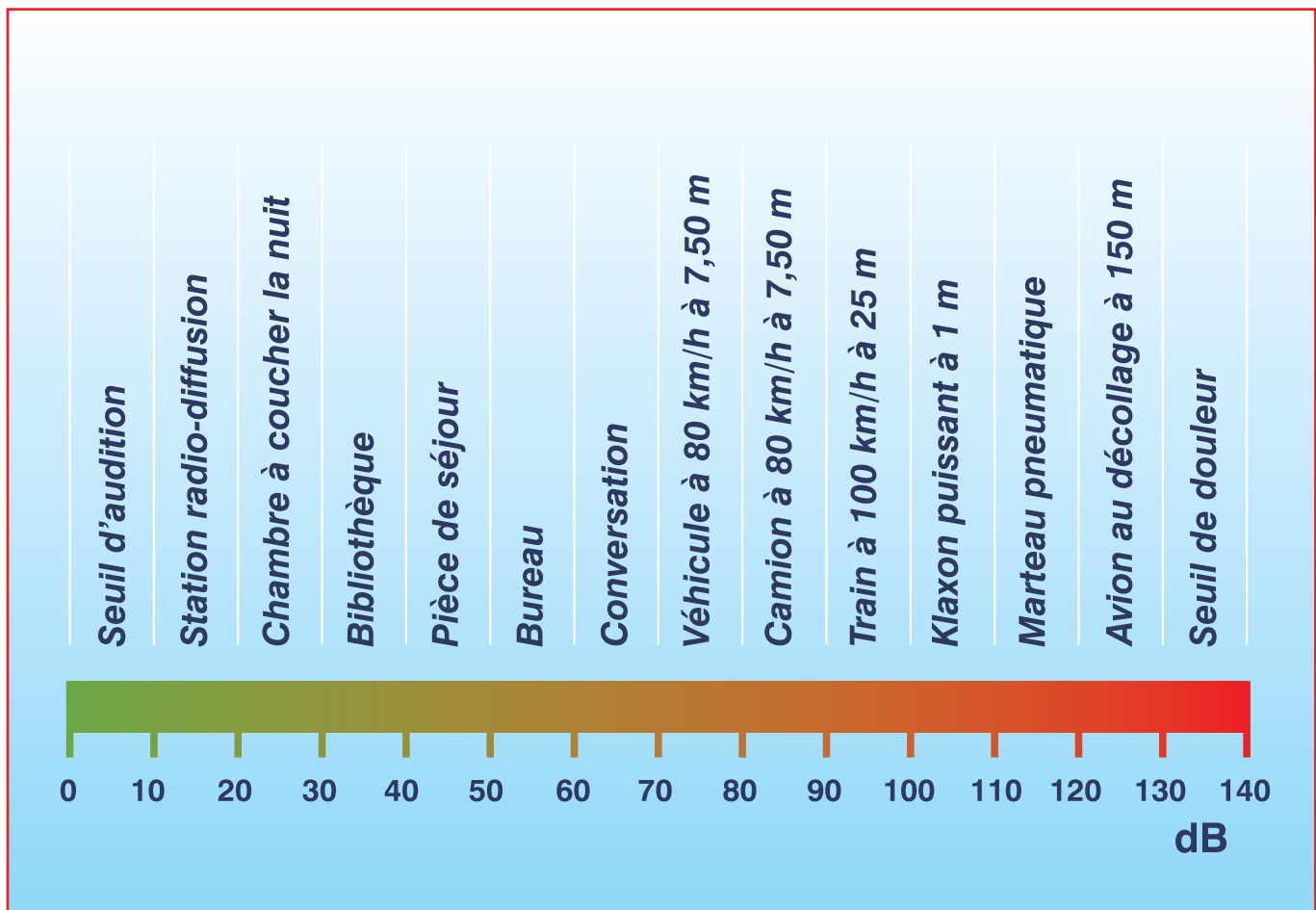
- un état des lieux dans les zones bruyantes et aux alentours permet de caractériser le site et de déterminer le type d'isolation nécessaire ;
- éloigner les nouvelles voies des habitations existantes ;
- placer les activités commerciales et industrielles proches des voies bruyantes ;
- placer les zones de logements dans les zones calmes du quartier ;
- disposer dans l'habitat les pièces les plus sensibles aux bruits dans les endroits les moins exposés.

Les bruits de voisinage sont à l'origine d'un sentiment d'inconfort. Des solutions pratiques peuvent être appliquées. Quelques solutions constructives sont envisageables, telles la pose de planchers sur dalles flottantes, de joints de dilatation des parois, d'escaliers non encastrés, ou encore le prolongement des parois séparatives dans les combles.

Afin d'assurer le confort acoustique des occupants, il faut les protéger des sources de bruit, et appliquer le principe du zonage des locaux dans le bâtiment.



Vue de Sirince en bord de mer Egée (Turquie). **1**



2 Valeurs de niveaux acoustiques.

Les spécificités d'usage des différents espaces d'un habitat varient selon les régions et les cultures. On appelle nomadisme le déplacement des habitants à l'intérieur du bâtiment, que ce soit vers les pièces les plus chaudes ou les pièces les plus froides. Le nomadisme peut être quotidien ou de saison. Il s'agit dans les deux cas d'une recherche de confort. Cette transition est essentiellement adaptée aux climats à forte amplitude thermique journalière ou saisonnière. Dans le cas d'un nomadisme saisonnier, certaines pièces ne seront occupées qu'une période de l'année. Leur affectation dépend de leur orientation au rayonnement solaire et de leur position respective par rapport à l'ensemble du bâtiment.

Dans les climats secs, nombres de bâtiments autorisent une multidisciplinarité des espaces. Ceci facilite le nomadisme à l'intérieur du bâtiment vers les pièces les plus fraîches. Pendant l'été, les habitants passent une grande partie de la journée au rez-de-chaussée. Cette conception peut permettre de prendre les repas sous la galerie, de faire la sieste dans le sous-sol, ou encore de dormir le soir sur une terrasse protégée des voisins par des murs élevés. Durant les hivers froids, les pièces supérieures peuvent être utilisées comme solarium. La superposition été/hiver est assez répandue dans l'habitat traditionnel du Maghreb et du Moyen-Orient. Elle existait par exemple à Samarra (Irak, IX^e Siècle), et s'est perpétuée dans les maisons traditionnelles de Bagdad, où le sous-sol et le rez-de-chaussée sont plus humides et moins ensoleillés que les étages.

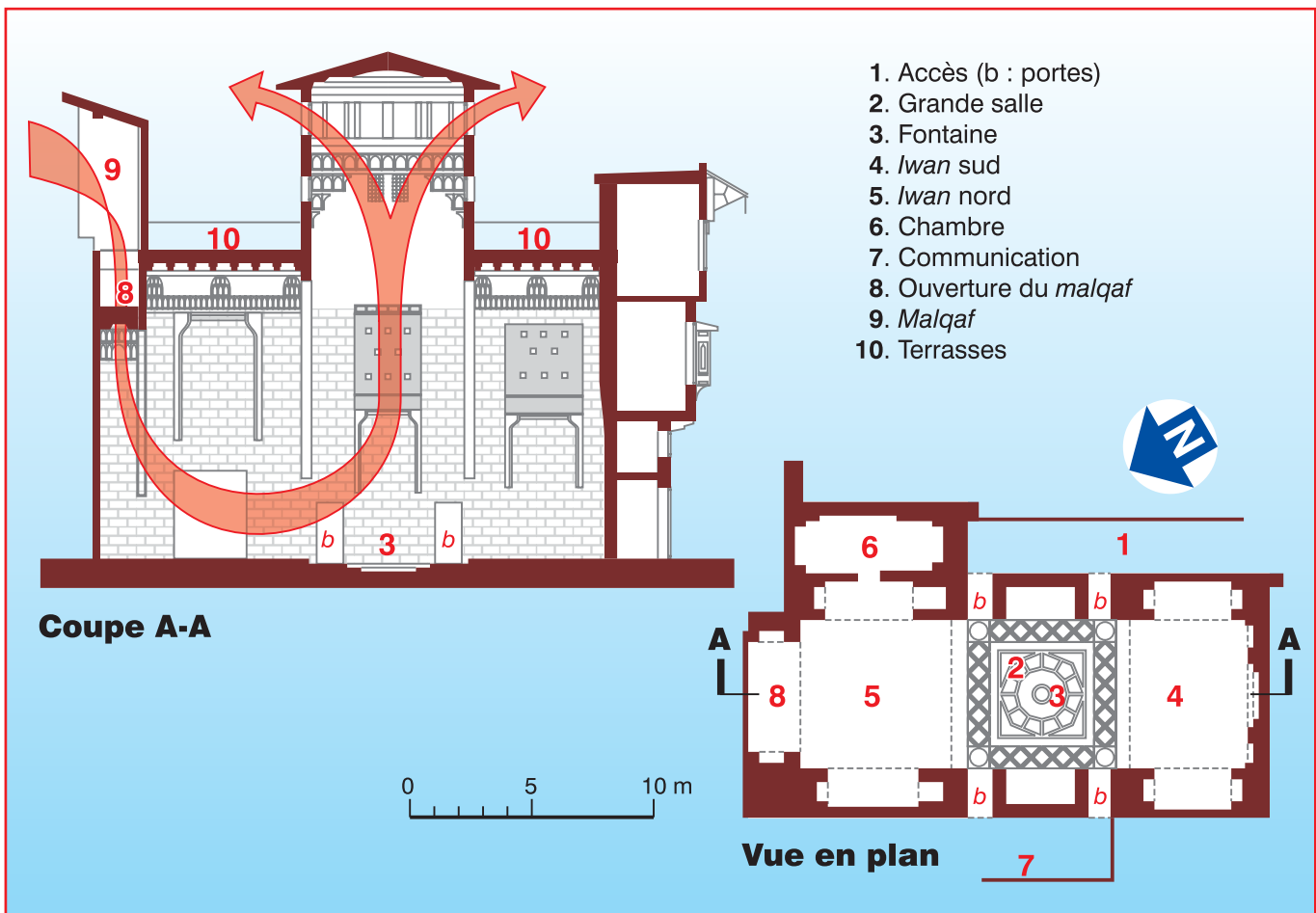
Il existe d'autres exemples de nomadisme à l'intérieur du bâtiment :

- des dispositifs saisonniers de protection solaire en façade ;
- des appartements d'hiver et d'été sur un même étage : l'un ouvrant au nord et l'autre au sud ;
- des espaces saisonniers de part et d'autre d'une cour fermée.

Dans les climats à forte amplitude thermique, l'habitat traditionnel permet aux occupants de migrer de façon quotidienne ou saisonnière, des pièces fraîches aux pièces ensoleillées.



Intérieur de la maison Beit de Suheimi (Caire). 1



2 Plan et coupe des restes de la demeure Uthman Karthuda du Caire - XV^e siècle (Egypte).

Quel que soit le contexte, le choix des matériaux et des techniques de construction conditionne la qualité du bâtiment. Il ne s'agit pas de rechercher un confort permanent à des coûts prohibitifs, mais plutôt de proposer des solutions appropriées aux modes d'habitat, ceci dans des limites et des coûts acceptables.

Citons 3 traits invariants pour le choix des matériaux de construction.

La notion de durabilité

La pérennité des matériaux est assurée par leur résistance dans le temps. Dans le cas du bois correctement traité, les charpentes et les menuiseries parviennent à résister aux pluies, vents violents et cyclones, à la putréfaction (proximité du sol et manque d'aération) et aux attaques d'insectes xylophages.

Le développement local

La valorisation des ressources locales (main d'œuvre, savoir-faire, matériaux), les problématiques propres à l'architecture identitaire et l'appropriation de l'habitat par les habitants sont des éléments du développement local (fiche 123 et 124).

La qualité du second œuvre et confort de l'habitat

Le traitement climatique en climat chaud concerne le gros œuvre et le second œuvre. Les recherches d'économie portent en premier lieu sur le second œuvre : systèmes d'ouverture faciles d'usage, cloisons coulissantes, pare-soleil... Ces choix déterminent en grande partie le niveau de confort d'un habitat.

Prenons l'exemple des vitrages en façade : lorsque les ouvertures sont mal protégées et de surcroît vitrées, elles favorisent les apports solaires thermiques. Le verre a la propriété non seulement de transmettre les rayonnements solaires, mais aussi de constituer un écran aéraulique. Sous les climats tropicaux, les vitrages amplifient considérablement la température intérieure. Ils sont proscrits dans le cadre d'un traitement climatique de l'habitat par ventilation naturelle. Il s'agit, pour de nombreux pays, de matériaux importés coûteux. Cela n'empêche pas de nombreux immeubles récents d'en être dotés pour des raisons acoustiques ou de référence aux modèles occidentaux.

Les prochaines fiches traitent des différences mises en œuvre permettant d'accéder à un niveau de confort thermique dans le bâtiment. Les thèmes de l'inertie thermique, du transfert de chaleur, de l'isolation, de la ventilation naturelle et mécanique, de la climatisation, des protections solaires et des plantations aux abords des bâtiments seront présentés.

Le confort est lié aux transferts de chaleur. L'inertie et l'isolation limitent la conduction, la ventilation agit sur la convection, la protection solaire et le revêtement de la façade influent sur les rayonnements, et la végétation favorise les pertes par évaporation.



Logements à Auroville (Inde). 1



2 Maison Schoelcher (Martinique) (arch. J. Nouel).

Lorsque les rayons du soleil frappent une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée, le reste est réfléchi. Un flux de chaleur s'établit alors entre la face externe et la face interne de la paroi. La chaleur, qui se transmet par onde de l'extérieur à l'intérieur, se propage avec un certain déphasage et subit un amortissement. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement senti sur la face intérieure de la paroi. Le temps de déphasage est fonction de l'épaisseur ainsi que de la conductivité thermique des matériaux.

Le déphasage et l'amortissement constituent l'**inertie thermique**.

Les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en deux grandeurs intermédiaires :

La diffusivité thermique "a" correspond à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau (unité : m²/h).

λ : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

ρ : masse volumique du matériau (kg/m³)

c : chaleur massique du matériau (Wh/K.kg)

$$a = \frac{\lambda}{\rho \times c}$$

La diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre une variation de température. Elle est directement proportionnelle à sa conductivité thermique et inversement proportionnelle à sa chaleur volumique.

L'effusivité thermique "b" représente la capacité d'un matériau à absorber un flux thermique instantané ((W/m².K)^{1/2})

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times c}$$

L'effusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à absorber (ou à restituer) une puissance thermique.

Pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en parois homogènes. L'emploi d'une paroi composite avec une faible diffusivité extérieure et une forte effusivité intérieure permet également de réduire l'amplitude du flux thermique.

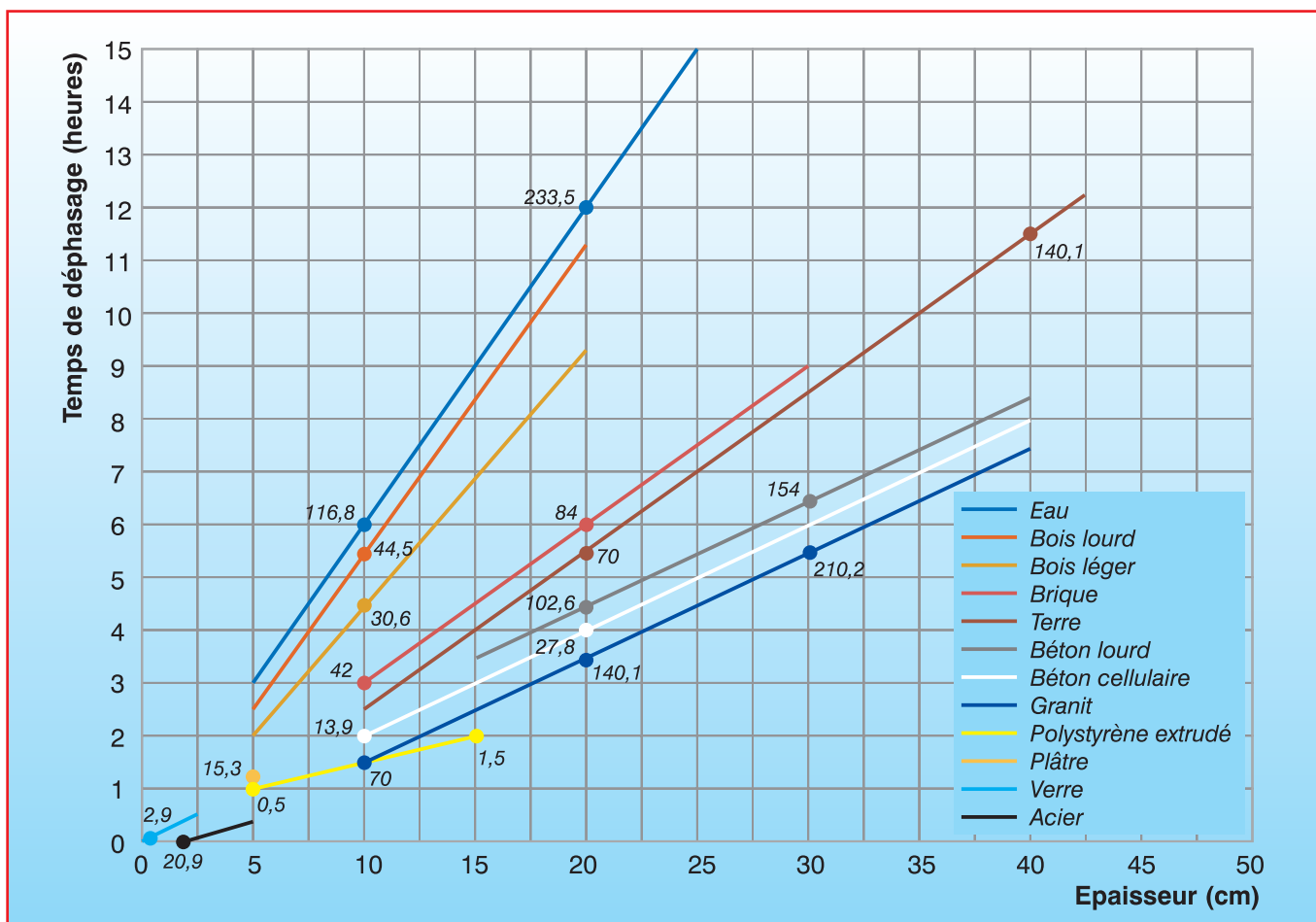
Les parois minces peuvent avoir des effets désastreux sur le confort. Très fines et non isolantes, leur réchauffement ou leur refroidissement est quasi instantané.

Le tableau indique la qualité de l'inertie thermique de quelques matériaux pour des épaisseurs usuelles d'utilisation. Ces résultats proviennent de simulations réalisées sous climat chaud pour une paroi de coefficient d'absorption de 0,7, orientée au sud.

L'inertie thermique d'un matériau mesure sa capacité à accumuler de la chaleur et à en différer la restitution après un certain temps : c'est le temps de déphasage.



Kasbah de Ouarzazate (Sud Maroc). 1



2 Temps de déphasage de divers matériaux de construction en fonction de leur épaisseur et quantité de chaleur accumulée pour des épaisseurs types, en Wh/m²K (d'après E. Gratia).

Toute paroi séparant deux ambiances constitue un obstacle au transfert de chaleur. L'effet d'isolation thermique d'un matériau se définit par sa conductivité thermique. Elle s'exprime en $W/m.K$ en termes de **coefficient de conductivité** " λ ". Ce coefficient traduit la quantité de chaleur traversant, pendant une heure et pour une différence de $1^{\circ}C$ entre les deux faces, une paroi d'un mètre d'épaisseur.

La conductivité thermique varie avec la température moyenne. Elle est essentiellement liée à la quantité d'humidité contenue dans le matériau. Lorsque le matériau utilisé est sec, la chaleur se transmet de particule à particule par l'air, peu conducteur. Si ces pores sont remplis d'eau, la conduction est plus rapide.

L'aptitude d'une paroi à laisser passer la chaleur se mesure par le **coefficient de transmission thermique** " k ", encore appelé "déperdition thermique surfacique des parois". k s'exprime en $W/m^2.K$. Ce coefficient mesure le pouvoir isolant d'une paroi. La nature du matériau, sa composition, et son épaisseur sont prises en compte.

On distingue trois groupes d'isolants : ceux à base minérale, ceux à base de plastique alvéolaire et ceux à base végétale. Les isolants à base de matière plastique alvéolaire présentent l'inconvénient du retrait thermique. Lorsque le matériau est soumis à une exposition prolongée à des températures de $80^{\circ}C$, sa nature est modifiée. Le tableau 2 de la fiche présente les caractéristiques de différents isolants.

En climat chaud et sec, l'inertie thermique permet de pallier aux importantes variations diurnes et nocturnes de température. Cette inertie peut être garantie par l'isolation de la toiture, responsable des 2/3 de transfert de chaleur de l'enveloppe vers l'intérieur du bâtiment (voir fiche 172 sur l'isolation des toitures).

En climat chaud et humide, en raison de la faible amplitude thermique, l'isolation n'est pas intéressante, et l'inertie thermique est à déconseiller. Des parois légères et claires permettent de réfléchir le maximum d'énergie incidente. Cependant, la conception de bâtiments climatisés exige une isolation thermique. La massivité atténue le flux thermique produit par l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

Il est important de protéger l'isolant contre la condensation et les infiltrations d'eau. Cette humidité diminue les capacités d'isolation du matériau et peut être à l'origine de moisissures. Une des premières mesures est d'assurer une ventilation suffisante des locaux.

Les insectes et les animaux causent quelquefois des dégâts sur les isolants. Aussi convient-il de protéger les parois.

Les matériaux isolants doivent avoir la capacité de résister aux fortes températures, à l'humidité, aux animaux et aux micro-organismes.



Pose de panneaux de chanvre. 1

Types	Matériaux	Conductivité thermique λ W/m.K	Température de fusion °C	Résistance à la diffusion de vapeur comparativement à l'air	Protection contre les animaux et les micro-organismes
Isolants minéraux	Laine de roche	0,036	1 200	1 à 2	+
	Laine de verre	0,040	700	1 à 2	+
	Verre cellulaire	0,042	600	infinie	+
	Perlite expansée	0,050	1 100	5 à 10	+
Mousses synthétiques	Polyuréthane	0,025	120	50	-
	Polystyrène expansé	0,036	80	20 à 150	-
	Polystyrène extrudé	0,028	80	150 à 300	-
Isolants à base de produits végétaux	Chanvre	0,040	120	1 à 2	+

2 Les caractéristiques des principaux matériaux isolants.

Contrairement à l'architecture climatique des régions froides et tempérées, celle des climats chauds doit éviter les apports solaires. Afin de limiter l'élévation de température, deux approches complémentaires existent. La première consiste à protéger les espaces habités des rayonnements solaires. La seconde met en place des débits d'air qui évacuent les apports thermiques internes et les apports solaires.

Les écoulements d'air permettent d'évacuer les charges thermiques du bâtiment liées aux machines électriques, à l'éclairage, et aux occupants. L'habitat vernaculaire de nombreuses régions propose d'exploiter des phénomènes climatiques pour atteindre des niveaux de température, d'humidité de l'air et des vitesses de vent confortables. L'ensemble de ces facteurs physiques participe au rafraîchissement.

Comme l'expliquent les schémas 2, la ventilation naturelle est toujours due à une différence de pression. Cette variation est due au vent ou à un écart de température.

Différents dispositifs permettent d'optimiser la ventilation naturelle :

- évaluer le potentiel de ventilation en fonction du site ;
- exposer les façades aux vents dominants des mois les plus chauds ;
- éloigner le bâti des obstacles à l'écoulement du vent ;
- protéger l'abord et l'enveloppe du bâti des rayonnements solaires ;
- dimensionner les ouvertures et les dispositifs qui favorisent les écoulements d'air dans les espaces intérieurs ;
- anticiper l'aménagement intérieur afin que les circulations d'air soient canalisées avec un minimum de frottements.

En climat chaud et sec, on peut par ailleurs :

- humidifier l'air et le rafraîchir par phénomène d'évapotranspiration ;
- profiter du rafraîchissement nocturne par l'inertie du bâtiment.

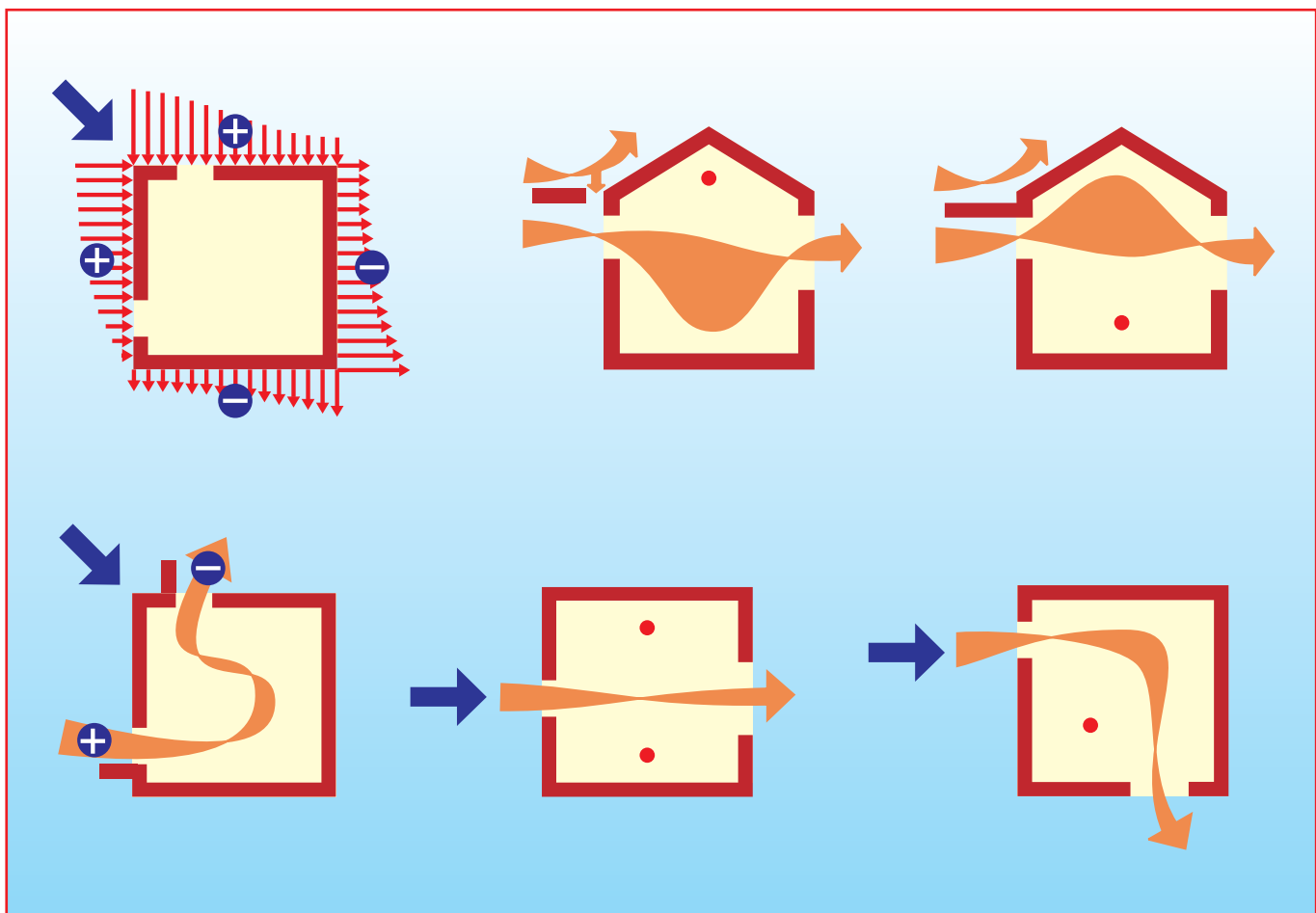
L'architecture vernaculaire propose spontanément des typologies d'habitat adaptées à la rigueur des climats chauds. Sous les climats chauds et humides, l'exemple malais propose un habitat surélevé du sol. Les formes longues et étroites des bâtiments, les percées multiples, la constitution ajourée des murs, les débords de toiture sont autant d'éléments de confort. Les matériaux utilisés sont de faible inertie thermique. Des distances importantes entre les maisons permettent au vent de s'écouler sans obstacle. Les parties orientées au nord et au sud sont surélevées afin de favoriser la ventilation transversale.

En climat chaud et sec, les quatre façades des maisons à patio protègent la cour centrale du soleil le jour et permettent l'évacuation de la chaleur la nuit.

La ventilation naturelle est provoquée par une différence de température ou de pression entre les façades d'un bâtiment. Elle permet d'évacuer des locaux les apports de chaleur interne et les apports solaires.



Maison Régis - Fort de France 1
(Martinique) (arch. Chiatello/Dabilly).



2 La ventilation naturelle est toujours due à une différence de pression, causée par le vent ou par un écart de température.

Certains locaux conçus pour optimiser la ventilation naturelle exigent des systèmes auxiliaires de ventilation mécanique. Les brasseurs d'air compensent l'insuffisance de ventilation naturelle lorsque les vents dominants tombent ou changent de direction. Ces ventilateurs sont, pour la plupart, peu énergivores et leur effet sur le bien-être de l'individu s'avère plus psychologique que réel.

Les ventilateurs sur pied offrent une liberté d'utilisation. Ils sont facilement déplaçables, leurs orientations sont diverses et leurs puissances réglables. Leurs flux très localisés peuvent être source d'inconfort. Ils deviennent peu efficaces au-delà de 4 mètres.

Les ventilateurs plafonniers assurent une meilleure répartition des écoulements au sein de l'espace habité. Ils sont également moins bruyants. Les écoulements horizontaux étant plus confortables, on gagne à ne pas placer les plafonniers juste au-dessus des zones les plus occupées.

En climat humide, les brasseurs d'air plafonniers sont efficaces pour accélérer le brassage d'air à l'intérieur de l'habitat lorsque la ventilation naturelle est insuffisante. Ils peuvent suffire à entretenir une circulation à peu de frais. Les pièces principales où les occupants séjournent le plus fréquemment doivent en être pourvues. Les brasseurs d'airs à pales métalliques sont plus efficaces que ceux à pales en bois ou en osier cannelé. Plus les pales sont grandes (diamètre supérieur à 1,20 m), plus les brasseurs sont efficaces.

La distance sous plafond doit être maximale, et supérieure à 30 cm. Les pales en rotation ne doivent créer aucun risque pour les habitants. Il existe pour cela des carters de protection à fixer lorsque les plans de rotation sont inférieurs à 2,50 m du sol.

Outre la hauteur sous plafond, un ventilateur plafonnier nécessite :

- une accroche solide ancrée à des positions choisies sur les plafonds ;
- une alimentation électrique et un interrupteur mural spécifique ;
- un accès pratique vers les commandes par variateurs.

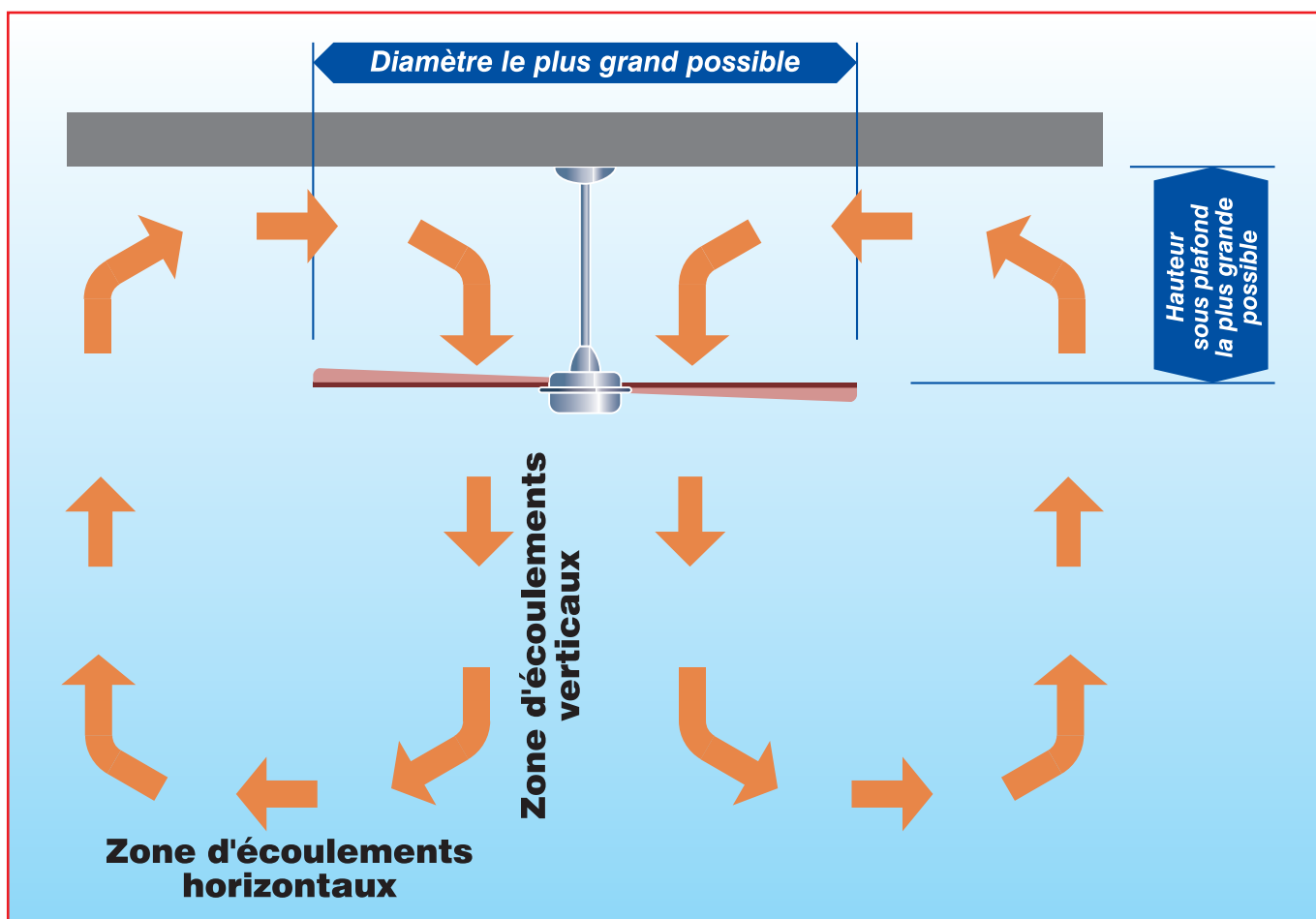
La répartition des accroches des brasseurs plafonniers de grand diamètre doit couvrir une surface de 16 m² (selon une préconisation du Label ECODOM). Pour des plans orthogonaux, cela correspond à des distances entre accroches et cloisons de 2 mètres.

Les brasseurs d'air augmentent la circulation des fluides qui entraînent un refroidissement physiologique. Leur utilisation d'appoint permet de renforcer une ventilation naturelle insuffisante.



Ventilateur de plafond. Saint-Denis (La Réunion) (arch. G Torcatis).

1



2 Schéma de distribution d'air d'un ventilateur de plafond.

Le climatiseur individuel permet, dans certains cas, d'atteindre un certain confort thermique. Souvent apprécié comme objet de valorisation sociale, son installation s'affirme depuis le début des années 80. Mais son utilisation n'est satisfaisante ni du point de vue économique, ni du point de vue énergétique. L'installation d'un système de climatisation peut, en outre, s'avérer contraire au mode d'habiter.

Les multiples climatiseurs individuels vendus sur le marché offrent des performances médiocres. Les utilisateurs et les vendeurs privilégient des climatiseurs bon marché, peu performants et à courte durée de vie. Le mauvais dimensionnement d'un système de climatisation s'avère source d'inconfort et pose des problèmes d'hygiène et d'allergie.

Le système de climatisation doit être pris en compte dès la conception du bâtiment. Il est préférable de prévoir des espaces de petites dimensions afin d'obtenir un système plus efficace et de pouvoir utiliser l'installation de manière intermittente et donc moins énergivore.

Les schémas de la fiche illustrent les grandes classes de climatiseurs existants :

- **Le climatiseur mobile monobloc** ne nécessite pas de travaux d'installation. Une gaine d'évacuation de l'air chaud est à prévoir par la percée d'un mur ou d'une fenêtre. Bon marché, il est très bruyant. Peu performant, il a une courte durée de vie (de 4 à 12 ans).
- **Le climatiseur de fenêtre** peut être à condensation d'air ou d'eau. Il s'installe en traversée de paroi ou de fenêtre. L'ensemble du système frigorifique est contenu dans une même enveloppe. Peu esthétique, il induit beaucoup de bruit et nécessite un coût d'exploitation important.
- **Les climatiseurs bi-blocs et multi-blocs** sont une version améliorée du "window system". Le circuit frigorifique est scindé en deux parties, permettant de placer les parties bruyantes à l'extérieur du bâtiment. Le "multi-bloc" a une unité de réfrigération extérieure et plusieurs unités intérieures de soufflage d'air frais. Sa durée de vie est de 10 à 18 ans. L'unité de soufflage intérieure peut être mobile ou fixe.

Aucun de ces trois systèmes n'autorise un contrôle fiable de l'humidité relative intérieure. Ils sont à proscrire en climat humide, où le niveau de confort est souvent lié au niveau d'humidité.

En cas d'inconfort, la climatisation peut être complémentaire à la ventilation naturelle. Certains systèmes évaporent le liquide dans le local, d'autres soufflent de l'air dans des gaines ou envoient de l'eau dans un réseau de tubes.

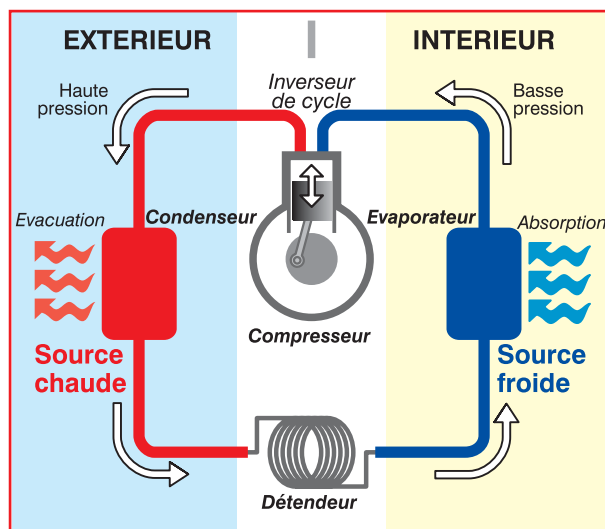
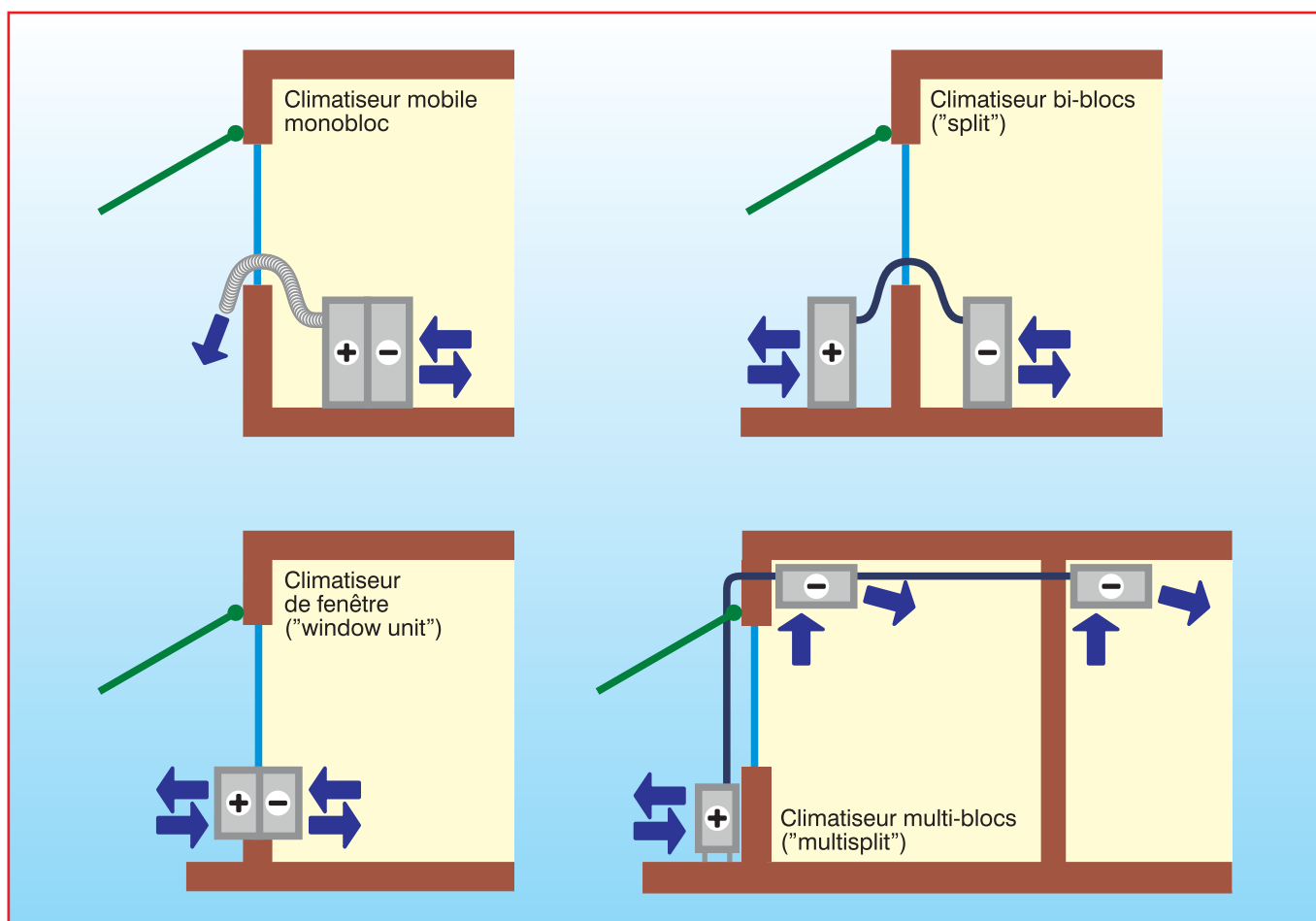


Schéma de fonctionnement d'un climatiseur. 1



2 Typologies de systèmes de climatisation mécanique individuels.

L'un des concepts de base de l'architecture bioclimatique en climat chaud est la protection du bâti face aux rayons solaires. Les matériaux isolants, les revêtements réfléchissants, les écrans ombrageants représentent quelques systèmes de protection.

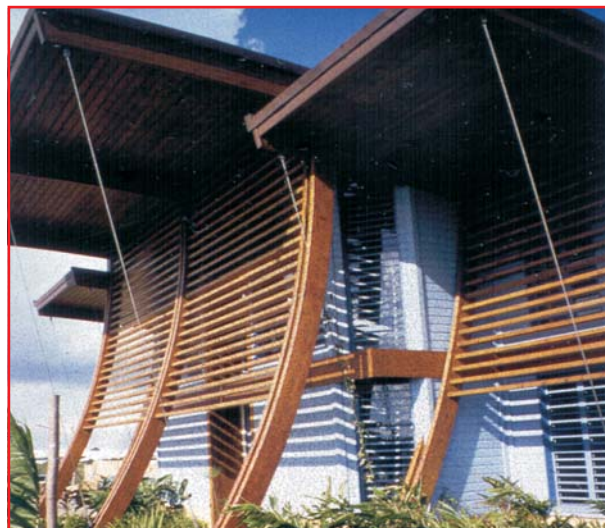
Dans l'hémisphère sud, c'est la façade nord qui est ensoleillée. Dans la zone intertropicale, le soleil éclaire alternativement les façades nord et sud selon la saison.

Dans les zones chaudes bordant l'équateur, on privilégie une implantation est-ouest. Le soleil est plus haut sur les parois orientées au nord et au sud. Les façades est et ouest sont éclairées par un soleil bas au cours de la matinée et dans l'après-midi. Les dispositifs de protection diffèrent selon l'orientation de la surface à protéger.

Différents types d'écrans permettent d'arrêter, de réfléchir ou de freiner les flux solaires. En façade nord et sud, le débord de toiture, et la conception d'espaces intermédiaires atténuent l'incidence des rayons solaires. A l'est et à l'ouest, les avancées verticales protègent du soleil bas, le matin et l'après-midi. La végétation extérieure participe également à la protection solaire. S'ajoute à cela le recours aux protections amovibles : volets, stores ou persiennes.

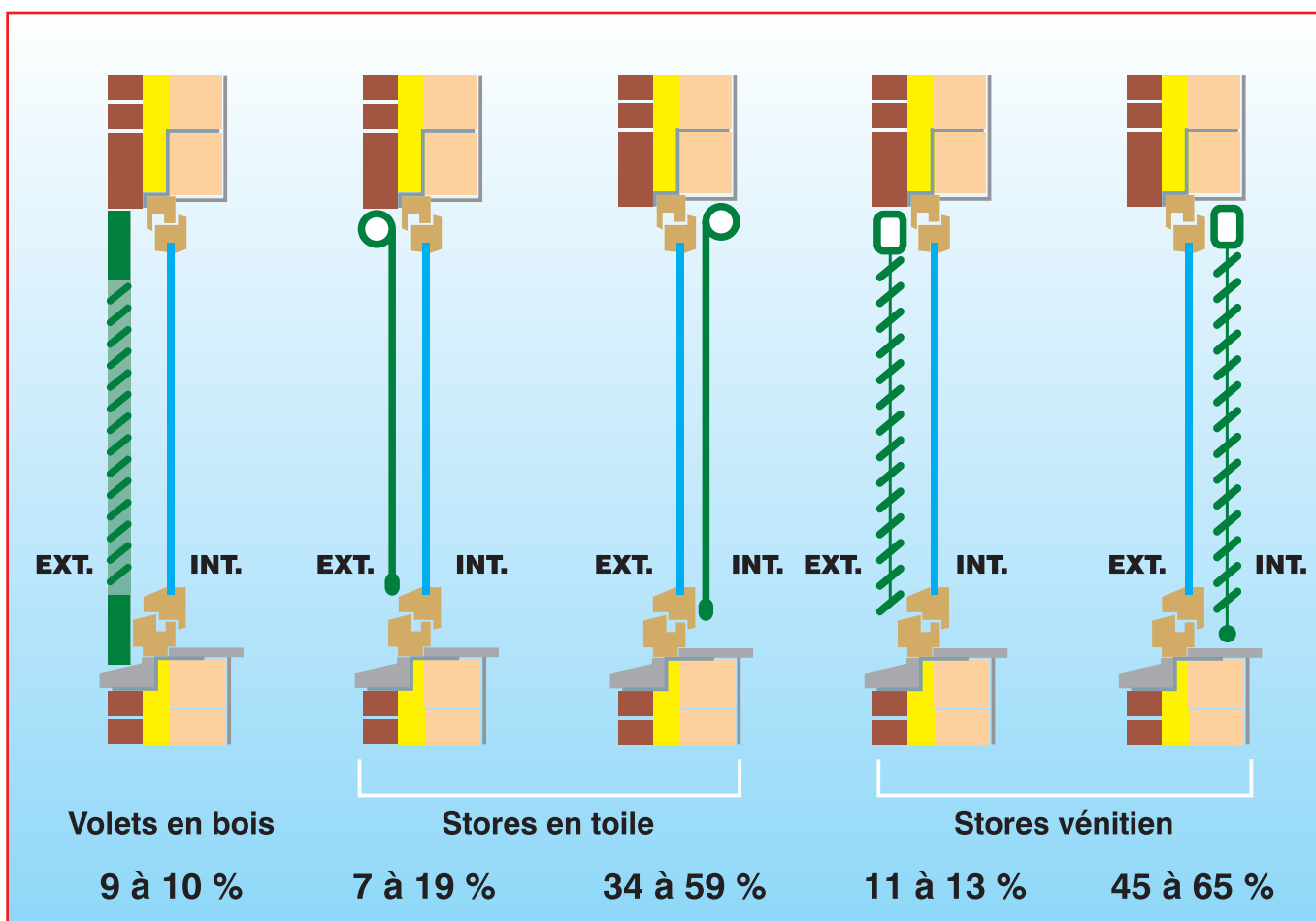
La hauteur et l'azimut du soleil varient en fonction du jour et de l'heure. Il en est de même pour les ombres projetées. Aussi, pour étudier la protection des parois et des ouvertures d'un bâtiment contre le rayonnement solaire, il est indispensable de connaître la localité donnée, le mouvement apparent du soleil pour toutes les heures du jour et périodes de l'année. L'étude de l'ensoleillement, et particulièrement des ombrages, est rendue plus simple avec l'emploi des diagrammes solaires. L'efficacité du système dépendra de la pertinence du choix du dispositif en fonction de l'orientation de la surface à protéger et de son bon dimensionnement.

Le facteur solaire est le rapport entre l'apport d'énergie solaire au travers de la baie protégée et l'apport d'énergie au travers de la baie non protégée.



Immeuble de bureaux et ateliers
Baie mahault (Guadeloupe)
(arch. P. Huguet)

1



2 Facteurs solaires de différentes protections solaires pour un vitrage simple.

La végétation participe à la protection solaire. Elle apporte un ombrage et crée un microclimat par évapotranspiration. Le choix de l'espèce est important car la qualité de l'ombre d'un arbre dépend de sa densité. Ainsi, le feuillage d'un arbre peut filtrer de 60 à 90 % du rayonnement solaire et un tapis de végétation réduit également le rayonnement solaire réfléchi par le sol.

La végétation est un outil efficace de protection solaire et de contrôle du rayonnement. Elle permet de stabiliser la température de l'air par rétention de l'eau dans ses feuilles et par évaporation de l'eau à leur surface. Lorsque l'eau est en contact avec l'air chaud non saturé, deux phénomènes se produisent : d'une part a lieu un échange de chaleur entre l'eau et l'air ; d'autre part, l'évaporation abaisse la température de l'air en puisant l'énergie nécessaire à son évaporation. Elle empêche la température nocturne de baisser rapidement et maintient la température diurne plus basse que celle de l'atmosphère. En zone tropicale sèche, la végétation crée un microclimat avec des températures plus faibles et un degré d'hygrométrie plus élevé. Ceci permet de se rapprocher du niveau de confort.

La végétation agit sur la qualité de l'air. En captant le carbone par le phénomène de la photosynthèse, elle transforme le CO₂ en oxygène.

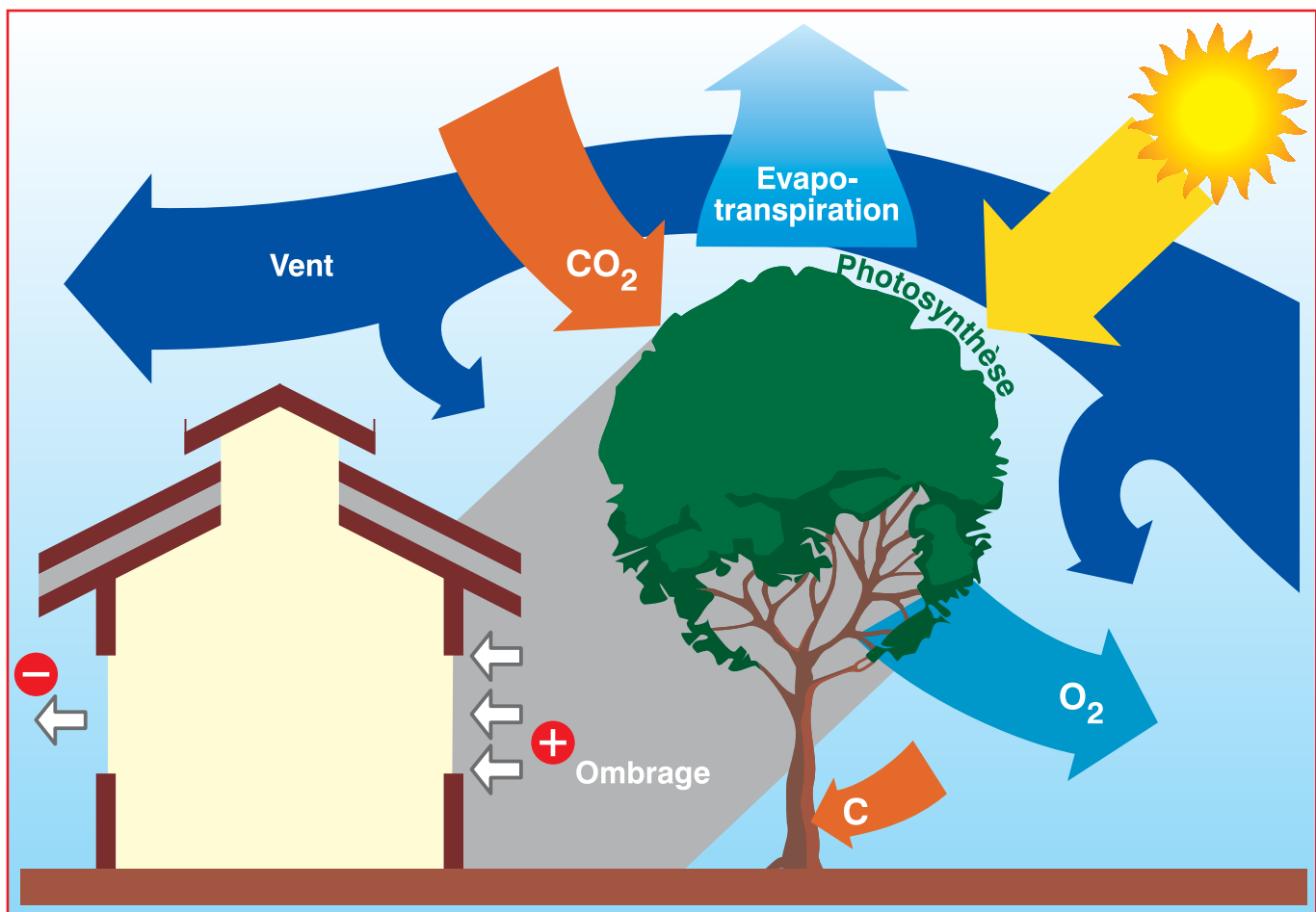
La végétation empêche le réchauffement du sol et son évaporation. Elle permet le contrôle de l'érosion du sol, atténue les bruits environnants et régule la circulation du vent autour des constructions. Les plantations créent des zones de basses et de hautes pressions favorisant l'écoulement de l'air au travers des bâtiments. Les arbres qui jouent le rôle de protection solaire doivent avoir un tronc élancé afin de ne pas freiner l'écoulement du vent.

En climat humide, la surabondance de la végétation au sol pose souvent un problème d'entretien des abords de la construction. Par contre, sur un sol de latérite souvent dénudé par les pluies, la végétation pousse difficilement.

La végétation permet l'ombrage, filtre les poussières en suspension, fait écran aux vents tout en favorisant la ventilation, oxygène l'air et le rafraîchit par évapotranspiration.



Patio à Séville (Espagne). 1



2 Les différents effets de la végétation.

Dans de nombreux contextes culturels, les espaces extérieurs sont essentiels aux pratiques des habitants. Une multitude de signes symboliques ou physiques permettent d'établir une hiérarchie de ces espaces extérieurs. La transition se fait des espaces publics aux espaces les plus privatifs. En fonction du contexte d'intervention, les espaces extérieurs contigus aux habitats, les chemins, les ruelles de voisinage, les rues, les places, ... nécessitent un traitement climatique. Le confort de ces espaces de transition est l'un des critères décisifs de leur utilisation.

La végétation doit être intégrée aux zones bâties afin d'améliorer l'environnement immédiat de chaque construction. Aux valeurs esthétiques s'ajoute le confort thermique qu'elle procure par l'ombrage, mais aussi par l'évaporation. Par ce biais, les températures ambiantes sont abaissées, le niveau d'humidité est amplifié et la ventilation naturelle canalisée.

Le label ECODOM préconise une protection efficace à l'ensoleillement direct par une bande d'au moins 3 mètres de large de végétalisation au sol ou d'écrans solaires sur les 2/3 de la périphérie du bâtiment.

En climat chaud et sec, l'évapotranspiration du sol peut participer au rafraîchissement de l'air ambiant. Ce phénomène est maximal aux limites des surfaces poreuses qui jouxtent des surfaces imperméables. Cette technique est limitée aux climats humides où le niveau d'humidité relative est déjà supérieur au niveau de confort hygrométrique.

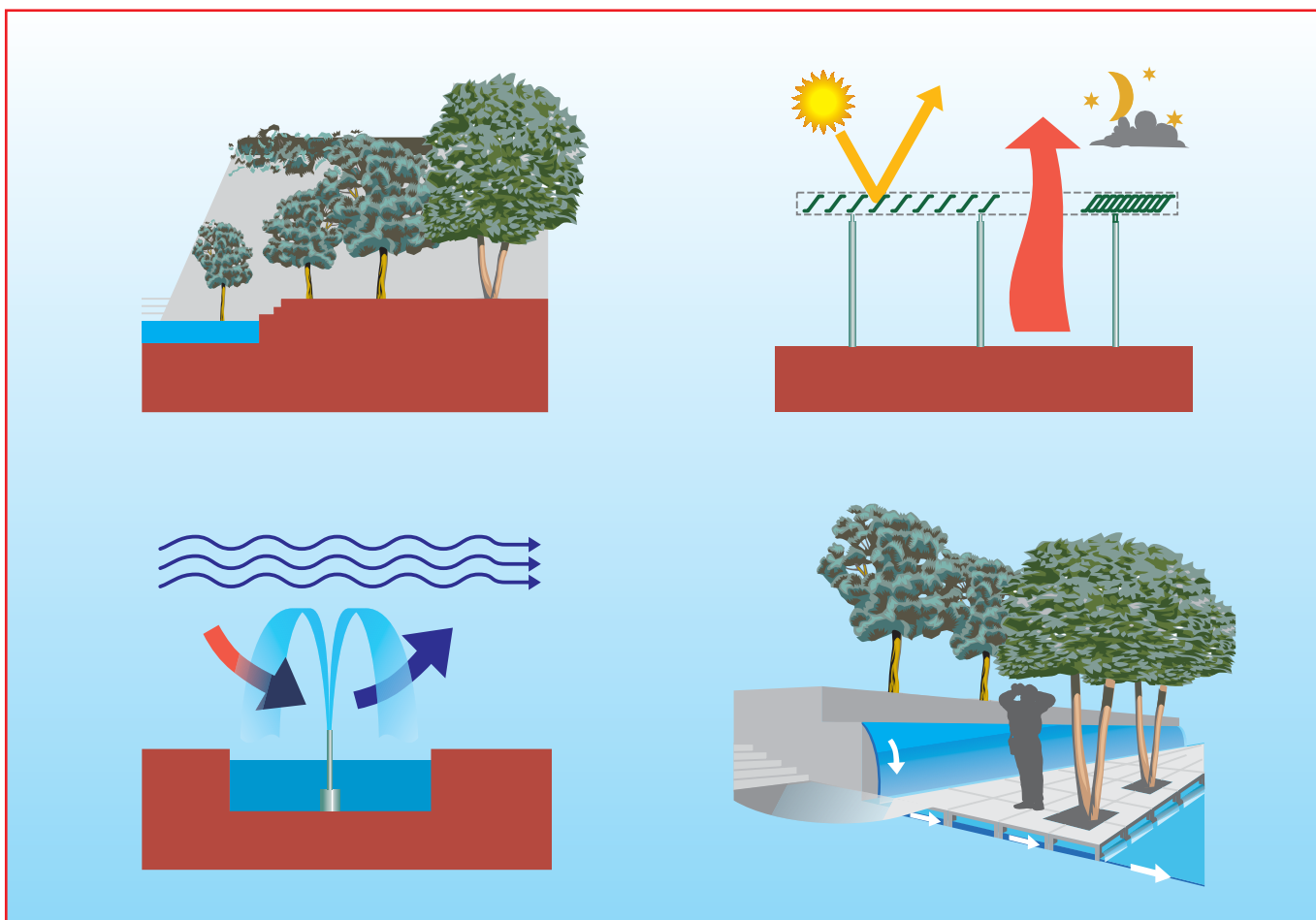
L'amélioration du confort thermique par le phénomène d'humidification de l'air concerne les climats chauds et secs. Or, dans ces zones, l'eau vient à manquer. Dans certaines régions, l'accès à l'eau constitue le premier poste de dépense des familles.

Les plantations aux abords des bâtiments diminuent les rayonnements solaires directs, réfléchis et diffus. Conjuguées à l'eau, elles favorisent un micro-climat d'air rafraîchissant.



Patio de l'Acequia du Generalife à Grenade (Espagne).

1



2 Techniques utilisées à l'exposition universelle de Séville en 1992 (Espagne) (arch. JL. de Asiain).

La ventilation permet, dans certains cas, d'atteindre le niveau de confort. Elle favorise les échanges de chaleur entre l'eau et l'air et évacue la transpiration. Il est important d'assurer une bonne ventilation des bâtiments mais également des espaces extérieurs. Le tracé des rues et l'orientation des bâtiments affectent les conditions de ventilation. La circulation naturelle de l'air est induite soit par une zone de passage des vents dominants, soit par courants d'air d'une zone de haute pression vers une zone de basse pression. Les basses pressions peuvent naître d'une forte exposition au rayonnement solaire. L'air, en se réchauffant, devient alors plus léger et la couche d'air moins lourde.

La ventilation est optimisée lorsque les rues sont orientées dans la direction des vents dominants. Seule la façade sur rue des bâtiments est en haute pression, les autres orientations restent en basse pression. Dans ce cas, la ventilation naturelle est partielle. Lorsque les constructions sont implantées diagonalement sur les parcelles, les zones de haute et de basse pression englobent alternativement le bâti, assurant ainsi une ventilation naturelle transversale sur toute la surface et permettant aussi d'éviter les problèmes de masques.

Les bâtiments orientés perpendiculairement aux vents dominants dévient les flux d'air. L'écoulement de l'air dans les rues est le résultat de la friction du vent aux angles du bâtiment, appelée "l'effet de coin". La vitesse du vent décroît graduellement en fonction de la hauteur des bâtiments et de leur distance de séparation.

En cas de forte densité urbaine, les surfaces de frottement augmentent, diminuant ainsi la vitesse du vent au sol. Cependant, les différences de températures à micro-échelle induisent des mouvements d'air locaux. Les immeubles de grande hauteur peuvent être à l'origine de courants d'air relativement violents. Les flux d'air plus rapides en hauteur sont déviés par les hautes constructions vers le bas, provoquant au niveau de la rue une accélération des vents.

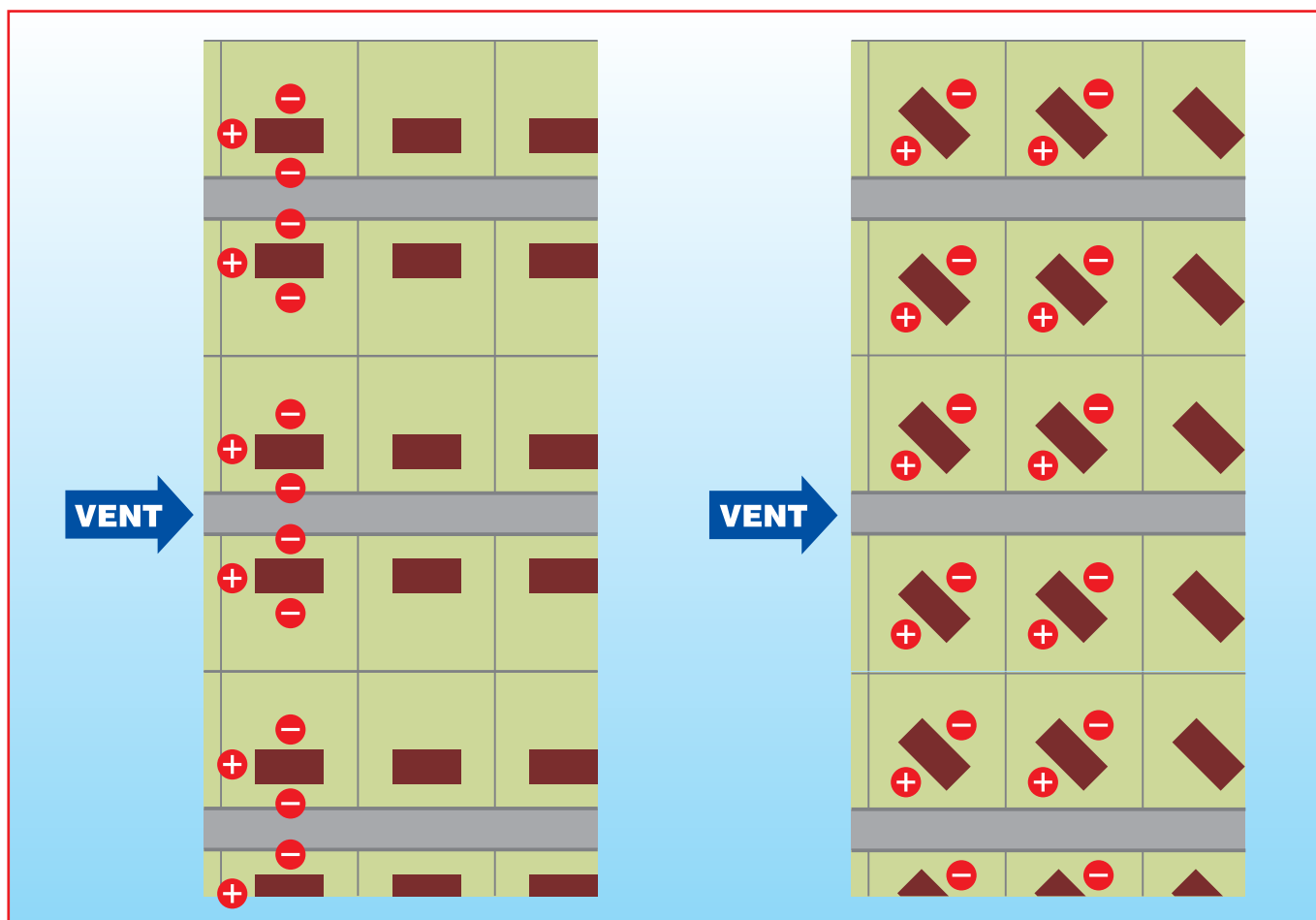
Afin d'assurer une bonne circulation de l'air, il est important de ménager des espaces suffisamment grands entre les bâtiments. Mais cet espacement diminue la protection au rayonnement solaire des bâtiments les uns par rapport aux autres. En région sèche, la protection au rayonnement prime sur la ventilation ; on préfère les plans compacts aux ruelles étroites et sinueuses. En climat humide, la ventilation est primordiale ; on préconise alors des plans plus aérés dans les limites de l'espace disponible.

L'analyse du parcellaire permet d'exploiter le potentiel du site lié au contexte urbanistique. La conception du plan-masse doit répondre aux exigences de ventilation, de vues, des accès...



Vue aérienne de quartiers résidentiels du Cap (Afrique du Sud).

1



2 Impact du tracé des rues et de l'implantation des bâtiments sur leur ventilation potentielle.

La topographie du site et l'environnement de proximité du bâti influent sur la potentialité de la ventilation naturelle. Certains sites sont correctement exposés au vent, d'autres sont au contraire peu ou pas ventilés. En climat chaud et humide, la ventilation est une condition essentielle du confort. Il est important d'implanter les constructions sur des sites topographiques propices au renforcement des vents.

En terrain plat dégagé de tout obstacle aéraulique, le potentiel de ventilation naturelle dépend de la fréquence des vents dominants.

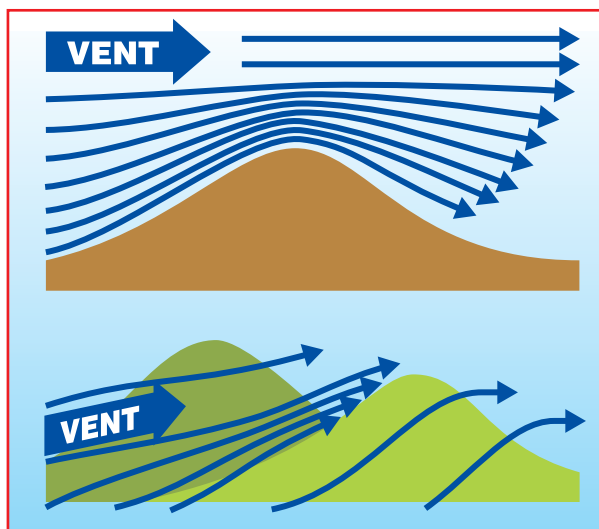
Une vallée parallèle aux vents dominants forme un véritable collecteur. En climat tropical humide, cette zone privilégiée est recherchée pour la ventilation qu'elle offre aux constructions.

Le potentiel de ventilation naturelle dépend de l'orientation de l'habitat par rapport au vent et de sa position dans le relief. Certains emplacements seront dits "au vent" ou "sous le vent". Sur les pentes exposées aux vents, le potentiel de ventilation est globalement meilleur qu'en terrain plat.

La partie basse d'une pente face au vent est une zone déventée. En sommet de colline, la concentration des filets fluides traduit une accélération importante du vent. Un effet local peut être à l'origine d'un décollement du vent induisant une zone déventée. Le potentiel de ventilation naturelle se réduit considérablement en forte pente. Le vent a tendance à se décoller du sol en arrivant au sommet de la colline. Des zones dépressionnaires en creux de vallées perpendiculaires aux vents peuvent ainsi apparaître.

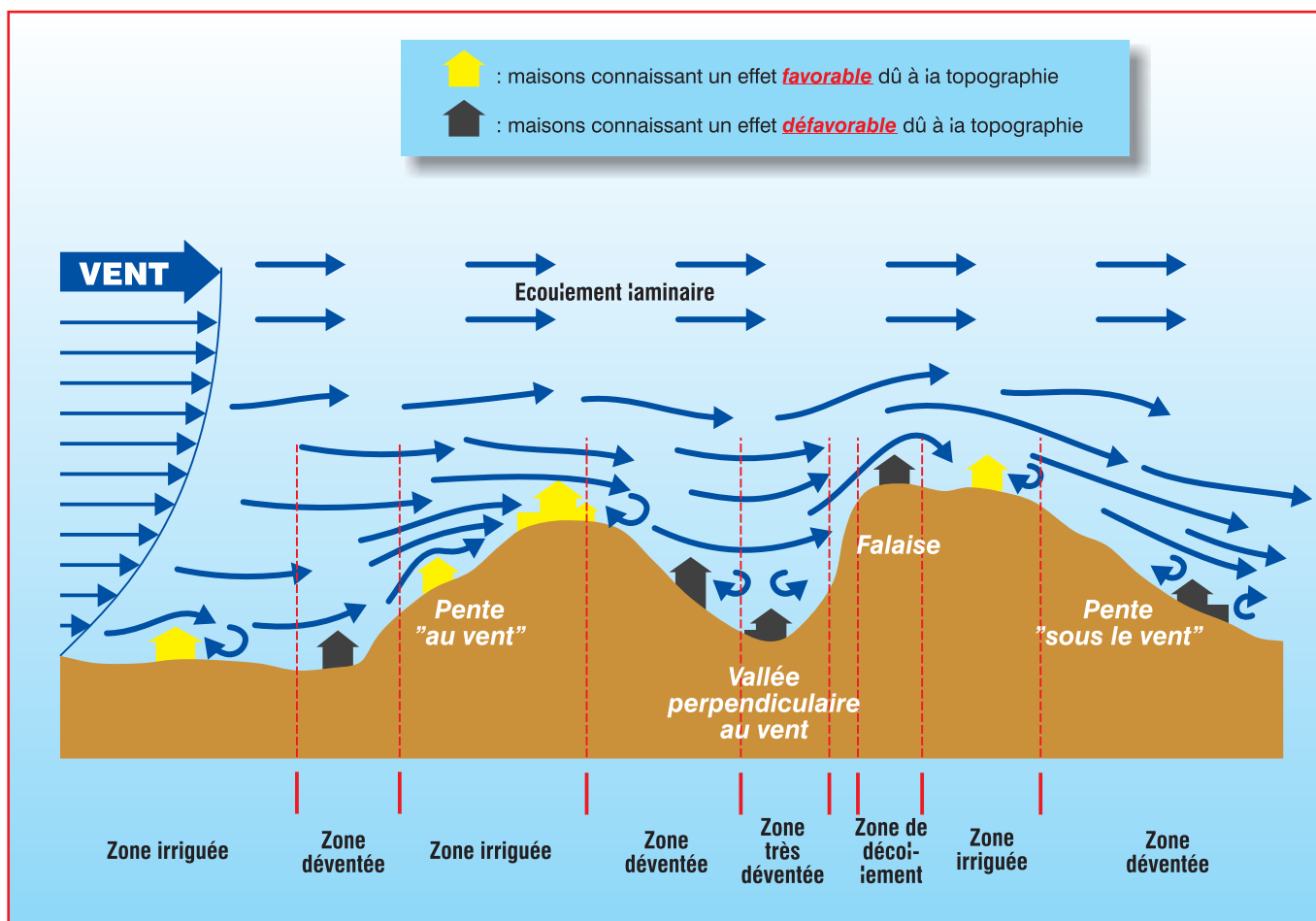
Les reliefs abrupts favorisent les effets topographiques locaux. Il est difficile d'y établir des règles. L'implantation favorable d'un bâtiment peut augmenter son potentiel de ventilation de 10 à 20 %. Par contre, une mauvaise implantation le diminuera de 30 à 70 %. Les constructions sont à éviter en pied de collines et dans les vallées d'axes perpendiculaires aux vents dominants. Il est préférable d'implanter le bâti en sommet de relief ou entre deux obstacles induisant un effet Venturi.

La topographie et l'environnement de proximité du site influencent fortement la potentialité de la ventilation naturelle des bâtiments.



“Concentration” du vent : au sommet de la colline et entre deux collines.

1



2 Zones favorables (irriguées) et zones défavorables (déventées) à la ventilation naturelle due au vent, en fonction de la topographie du site (d'après le CSTB/France).

Le vent caractéristique d'un site se définit par la combinaison de sa vitesse moyenne et de son intensité de turbulence.

La vitesse moyenne du vent sur un site est liée à des phénomènes aérodynamiques et thermiques complexes à formuler. Au niveau des basses couches atmosphériques comprises entre 0 et 300 m d'altitude, la vitesse moyenne du vent varie avec la topographie du site, la stratification thermique, la hauteur et la rugosité du sol. En effet, dans une zone à relief, les différents accidents du site influent sur les caractéristiques du vent.

Dans les basses couches, la stratification thermique a une influence sur les écoulements d'air pour des vents de vitesse inférieure à 10 m/sec à une hauteur de 10 m du sol. Au-delà de cette vitesse, les effets thermiques deviennent négligeables. Les physiciens admettent alors que la stratification thermique est neutre.

En terrain plat de stratification thermique neutre, l'influence de la hauteur et de la rugosité du terrain expriment "la loi de puissance" :

$$U(Z) = U_{\text{réf}} \cdot (Z/Z_{\text{réf}})^{\alpha}$$

$U(Z)$: vitesse moyenne du vent à une hauteur Z ;
 $U_{\text{réf}}$: vitesse moyenne de référence donnée par les stations météorologiques ;
 Z : hauteur à laquelle on calcule la vitesse du vent ;
 $Z_{\text{réf}}$: hauteur de référence, à laquelle a été mesuré $U_{\text{réf}}$ à la station météorologique ;
 $U_{\text{réf}}$: variable aléatoire liée aux différentes vitesses observées. La vitesse la plus fréquente est retenue.

Une amélioration de cette formule revient à prendre en compte la rugosité du sol. Le tableau 1 présente les 5 classes de rugosité du site. Afin de tenir compte de ce paramètre, on introduit une constante de rugosité. Plus l'altitude est importante, moins la rugosité du sol influe sur la vitesse du vent. Un modèle logarithmique permet de décrire la croissance de la vitesse moyenne avec l'altitude.

$$U(Z) = k_0 \cdot U_{\text{réf}} \cdot \ln(Z/Z_{\text{réf}})$$

k_0 : coefficient qui varie avec la rugosité.

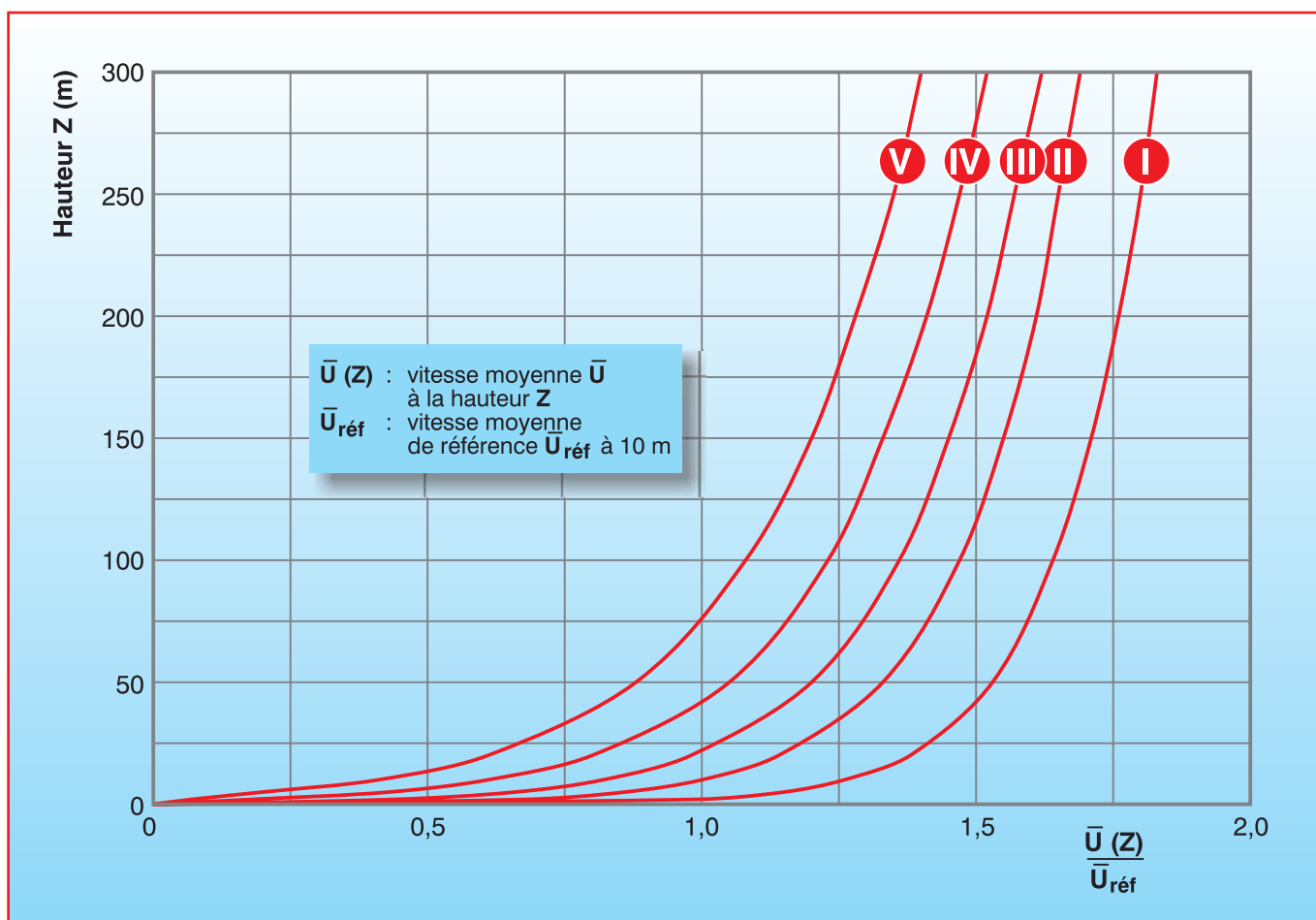
La turbulence dépend essentiellement de la nature du terrain. Elle se détermine selon une échelle spatio-temporelle par la dimension des bouffées et des rafales du vent. Cette dimension dynamique du vent se traduit par une échelle de turbulence longitudinale suivant l'axe de la vitesse du vent.

Le graphe de la fiche permet de déterminer la vitesse du vent en fonction de la hauteur à partir de la connaissance de la vitesse de référence du vent de la station météorologique la plus proche. Ainsi, si l'on se trouve en ville, et que l'on cherche à connaître la vitesse du vent à une hauteur de 50 m, le graphe nous indique que le rapport de la vitesse à cette hauteur par rapport à la vitesse de référence est de plus ou moins 0,85. Si la vitesse de référence est de 5 m/sec, la vitesse recherchée sera alors de 4,25 m/sec.

Les caractéristiques du vent varient en fonction de l'environnement du site, de la rugosité du sol, de la stratification thermique et de la hauteur.

Environnement du site	Classe de rugosité
<i>Bord de mer totalement dégagé</i>	I
<i>Rase campagne</i>	II
<i>Zone rurale avec bâtiments ou arbres isolés</i>	III
<i>Zone urbanisée ou forestière</i>	IV
<i>Grande ville</i>	V

Les classes de rugosité en fonction de l'environnement du site. **1**



2 Des formulations simplifiées donnent l'état moyen de la vitesse du vent en fonction de la hauteur.

Pour qu'il y ait ventilation effective, il faut que le vent puisse accéder aux abords immédiats des constructions sans être exagérément freiné par des obstacles. L'influence d'un obstacle peut se faire sentir jusqu'à une distance de 4 à 12 fois sa hauteur. Cette distance est fonction des caractéristiques géométriques des obstacles, de leur orientation par rapport au vent, de leur implantation et de leur porosité.

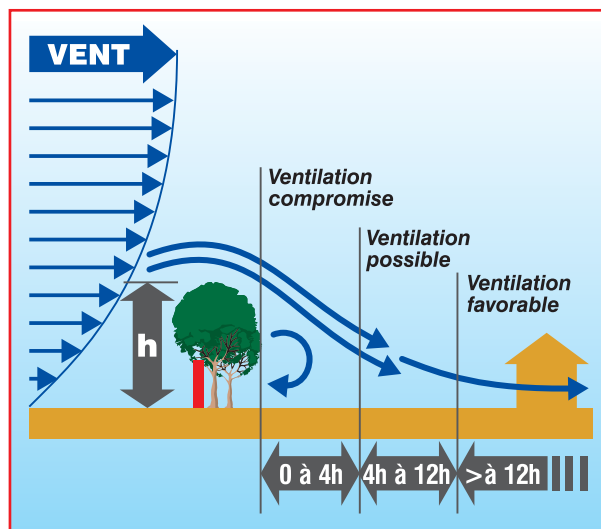
Juste derrière un obstacle se crée une zone tourbillonnaire. Le potentiel de ventilation d'une habitation placée dans une telle zone est fortement réduit car la façade exposée au vent n'est plus en surpression. Une certaine distance par rapport aux obstacles, permettant au vent de retrouver ses caractéristiques "laminaires", garantit une zone de ventilation favorable. Dans les régions chaudes et sèches, l'ombrage apporté par les obstacles prime sur la diminution du potentiel de ventilation.

L'influence des obstacles aérauliques dépend de la combinaison des distances d'éloignement de ces masques en fonction de leur volume et de leur répartition spatiale. Plus les bâtiments sont courts et profonds, moins la distance d'éloignement à respecter entre eux doit être grande. Les obstacles aérauliques placés en hauteur laissent passer le vent en dessous d'eux. Ainsi, les arbres aux troncs élancés permettent le passage du vent à hauteur d'homme. On privilégie également les constructions sur pilotis et intégrant des écopés en toiture car elles affectent beaucoup moins la ventilation du plan de masse.

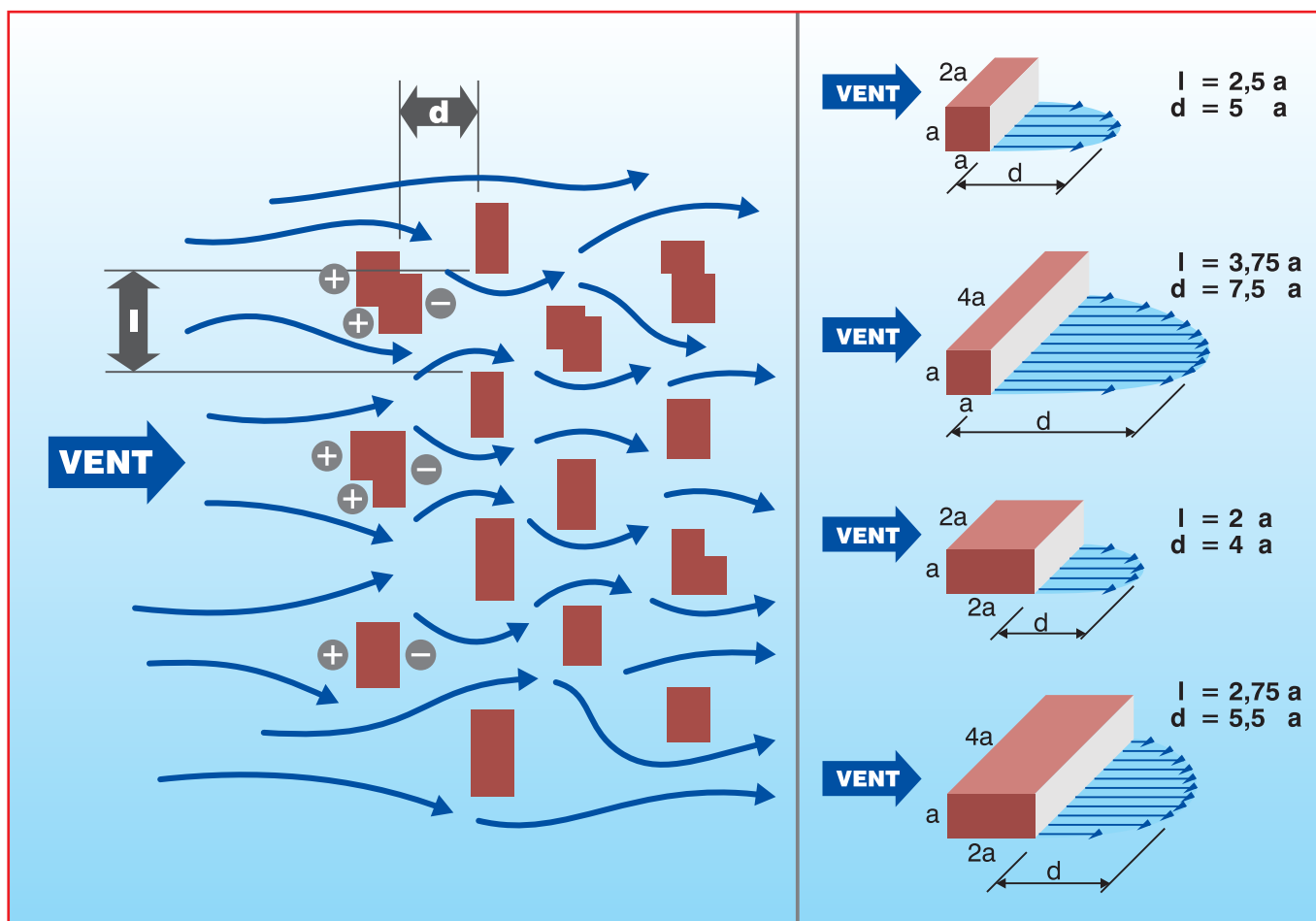
L'optimisation du plan de masse consiste à développer des mécanismes de brassage de l'air et à canaliser les écoulements aérauliques en tenant compte de la nature des régimes des vents.

Dans un plan de masse constitué de rangées de bâtiments exposés aux vents, la première ligne exposée est toujours la mieux ventilée. Les espacements entre les constructions des rangées suivantes affectent les conditions de ventilation des maisons. Les interstices, les failles, les passages entre les obstacles tendent à réduire les mouvements tourbillonnaires responsables de la diminution du potentiel de ventilation. Un obstacle composé de petits plots bâtis d'une porosité frontale au vent de 66 % est une configuration qui permet une ventilation naturelle des bâtiments distants les uns des autres de moins de 4 fois leur hauteur. Une étude aérodynamique au cas par cas est nécessaire. De manière générale, un schéma en quinconce est préférable car il permet d'éviter les effets de masque du bâtiment placé en amont par rapport au vent.

Les obstacles de proximité influent sur la ventilation des bâtiments. Les effets varient avec la distance, la situation, la hauteur, la porosité, et le volume des constructions.



Potential de ventilation d'un bâtiment en fonction de l'éloignement d'un obstacle aéraulique. **1**



2 Distances à respecter pour permettre la ventilation naturelle d'un ensemble de bâtiments soumis au vent.

Les masses d'air contournent le bâtiment selon un écoulement qui varie avec la géométrie et les dimensions du bâti par rapport à l'échelle de turbulence. Les caractéristiques de cet écoulement sont déterminées par la position des bâtiments par rapport à l'obstacle.

On peut ainsi décomposer chaque site en plusieurs zones :

- la zone en amont du bâtiment : le vent suit un écoulement laminaire où tous les filets fluides sont quasiment parallèles ;
- une zone de détournement de l'écoulement moyen, de part et d'autre du bâtiment : les filets fluides ont pour réaction de se resserrer, le vent prend de la vitesse mais reste en régime laminaire ;
- une zone tourbillonnaire dans laquelle le vent devient turbulent : les filets fluides perdent leur parallélisme et prennent trois directions ;
- une zone intermédiaire, la couche de cisaillement, liée aux phénomènes visqueux le long des murs : les mélanges dans cette couche augmentent avec la turbulence ;
- une zone décollée avec recirculation due aux écoulements complexes le long des parois, dépendant des aspérités le long des murs ;
- des décollements au niveau des angles vifs du bâtiment.

L'écoulement des masses d'air autour d'un bâtiment varie avec la géométrie et le volume de la construction. La déviation des fluides est également liée à la turbulence existante du vent.

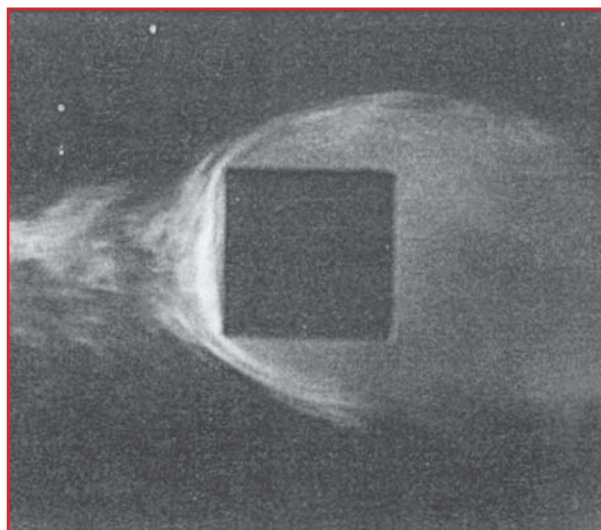
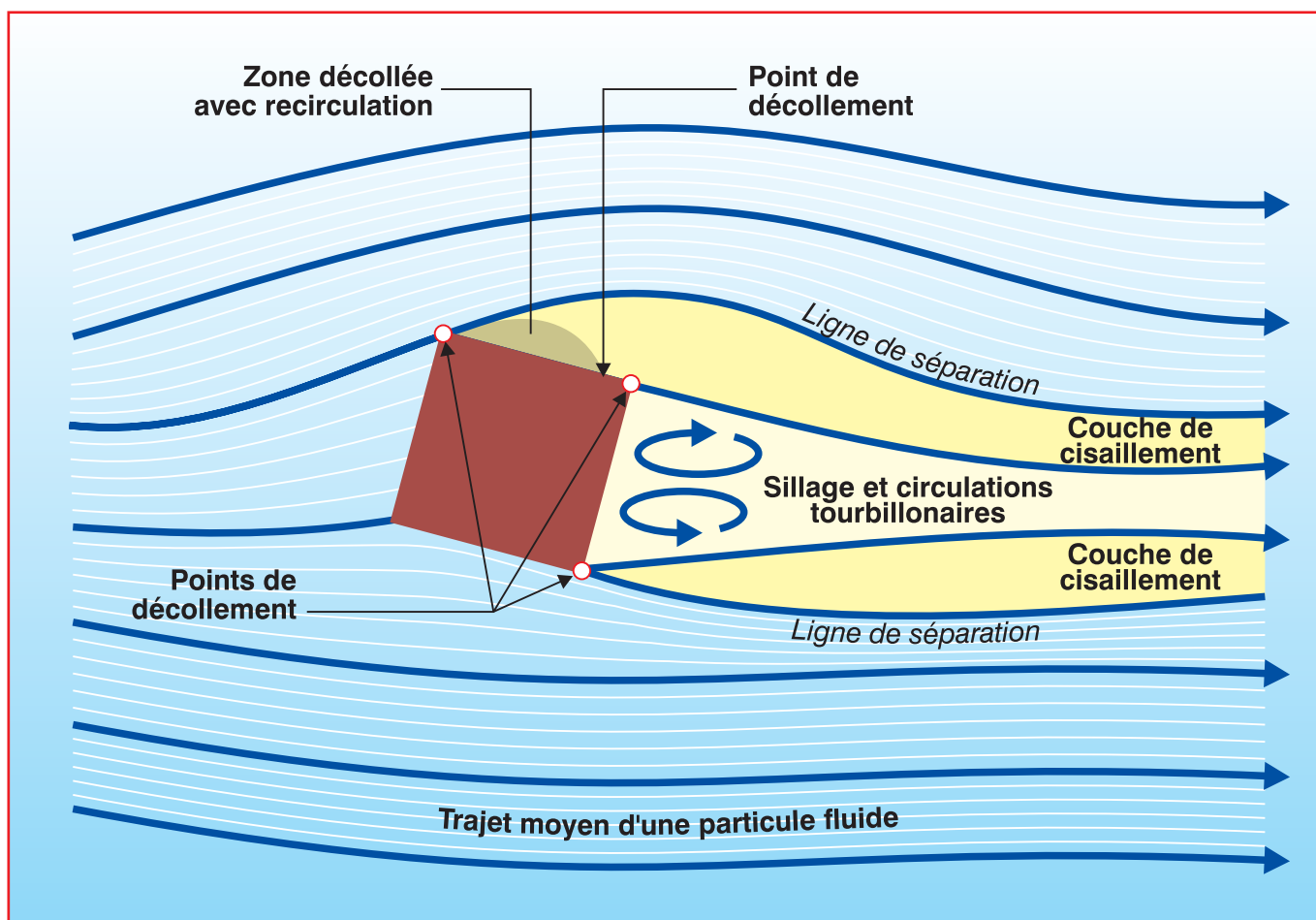


Image d'un essai en soufflerie. 1



2 Vue en plan des phénomènes d'un écoulement turbulent qui rencontre un bâtiment parallélépipédique.

La vitesse et l'orientation du vent autour des bâtiments diffèrent de celles du vent météorologique. Les alentours de la maison peuvent freiner ou accentuer le profit de la brise naturelle.

Garantir une ventilation naturelle importante d'un bâtiment en climat chaud implique la création de zones de haute pression et de basse pression. En effet, la différence de pression dirige le courant d'air autour du bâti et à travers lui, rétablissant ainsi l'équilibre. Assurer une porosité suffisante des parois du bâtiment permet à l'air de pénétrer du côté de la haute pression et de s'évacuer du côté de la basse pression. La haute pression se développe du côté du bâtiment où la couche d'air est plus épaisse et la basse pression suit le processus inverse.

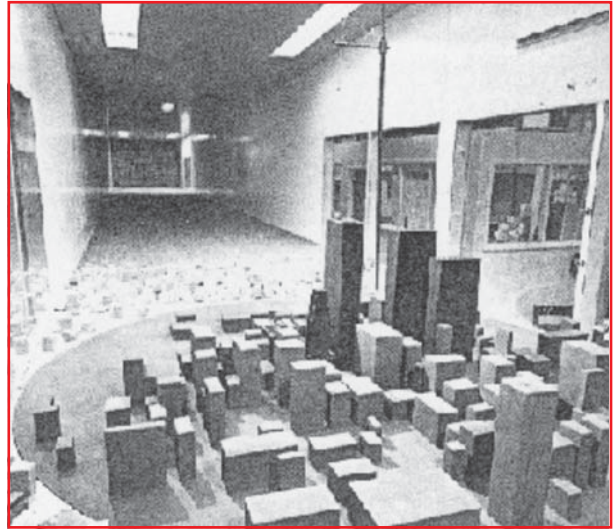
Le champ des pressions autour de l'enveloppe et leur distribution résultent de :

- la forme du bâti, ses dimensions, la rugosité de son enveloppe ;
- la nature de l'environnement et les obstacles immédiats du site ;
- la vitesse moyenne et la structure de turbulence du vent incident.

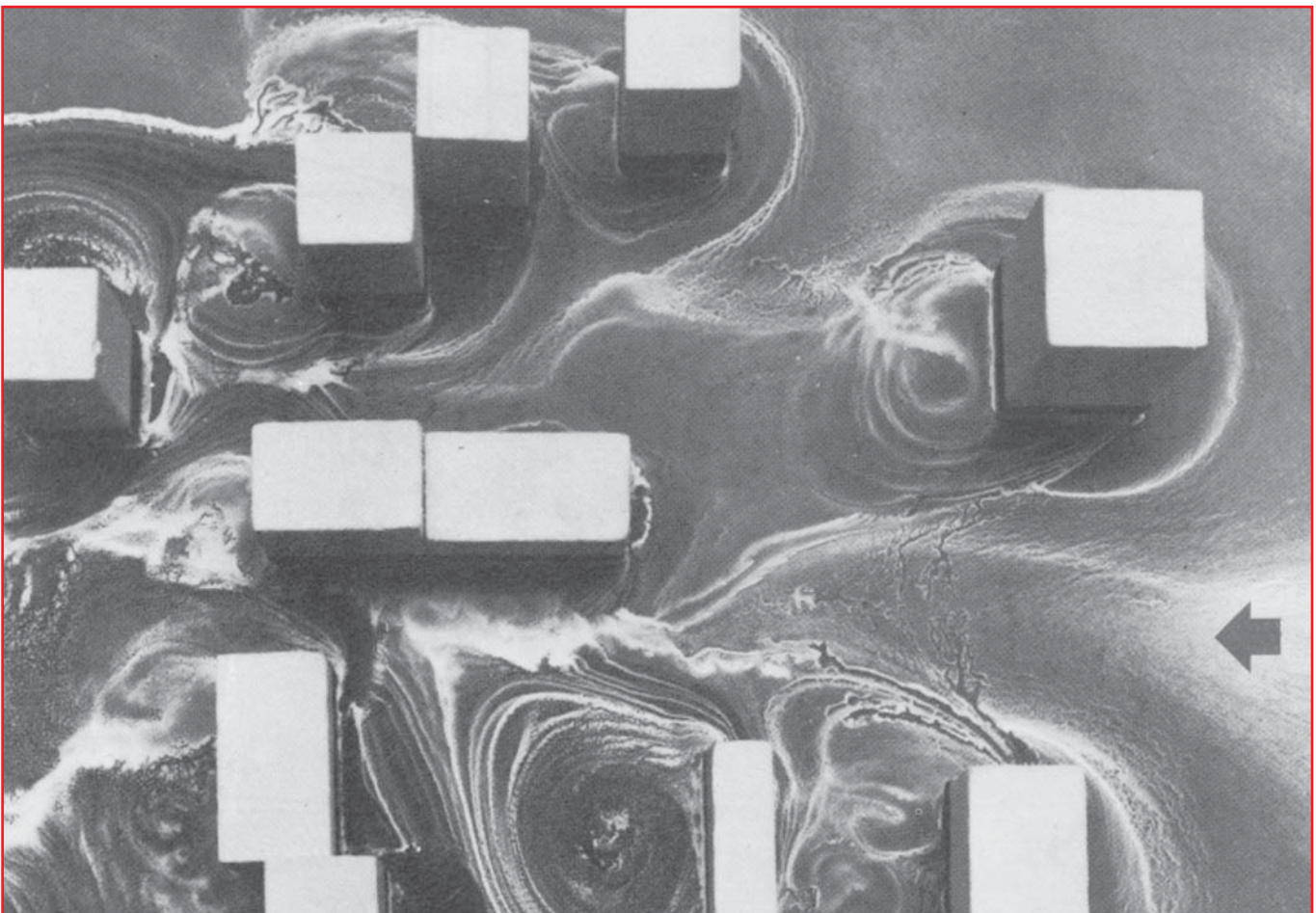
Ce champ de pression peut être analysé précisément à partir de simulations informatiques ou d'expériences en soufflerie atmosphérique. Dans le cas de l'immeuble "barre", on observe une surpression face au vent, un décollement avec dépression au niveau des angles du bâtiment et un sillage dépressionnaire tourbillonnaire qui reste présent sur une grande distance en aval du flux.

En climat chaud, il est conseillé de privilégier des formes de bâtiments qui favorisent les surpressions des façades ouvertes au vent et les dépressions des façades ouvertes sous le vent.

Il existe autour des bâtiments des zones de surpression et de dépression. Les écoulements et les équilibrages dus aux différences de pressions induisent des courants d'air.



Maquette d'essai en tunnel à vent. 1



2 Image d'un essai en soufflerie pour un ensemble de bâtiments.

En climat humide, il est nécessaire d'établir, à l'intérieur du bâti, un écoulement d'air continu rencontrant le minimum d'obstacles.

Cette ventilation favorise :

- le maintien de la qualité de l'air intérieur. Elle remplace l'air vicié par l'air neuf ;
- une participation au confort thermique du corps. En climat humide, la ventilation engage une perte de chaleur par convection. En climat sec, elle induit l'évaporation de la sueur. En climat humide, les besoins en ventilation priment sur les nécessités d'ombrage ;
- un refroidissement de la masse interne des bâtiments par la ventilation nocturne. Elle est efficace si les écarts journaliers de température sont importants. Les bâtiments à forte inertie thermique permettent de "stocker" de la fraîcheur pendant la nuit et de la restituer aux heures les plus chaudes de la journée.

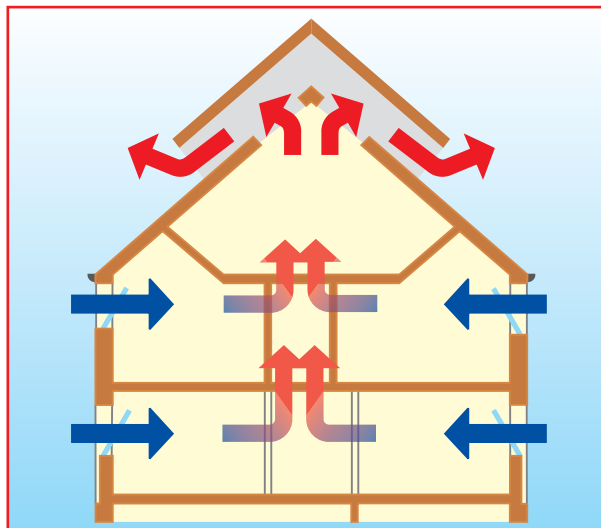
La ventilation naturelle s'explique par une différence de pression entre deux espaces. L'écart de pression accentue le potentiel de ventilation.

Certains conseils permettent d'optimiser la ventilation naturelle au sein même d'un bâtiment. Ces recommandations ne sont en aucun cas "le" processus de conception de l'habitat. Il s'agit de recommandations complémentaires aux contraintes sociologiques, économiques et techniques propres à chaque projet.

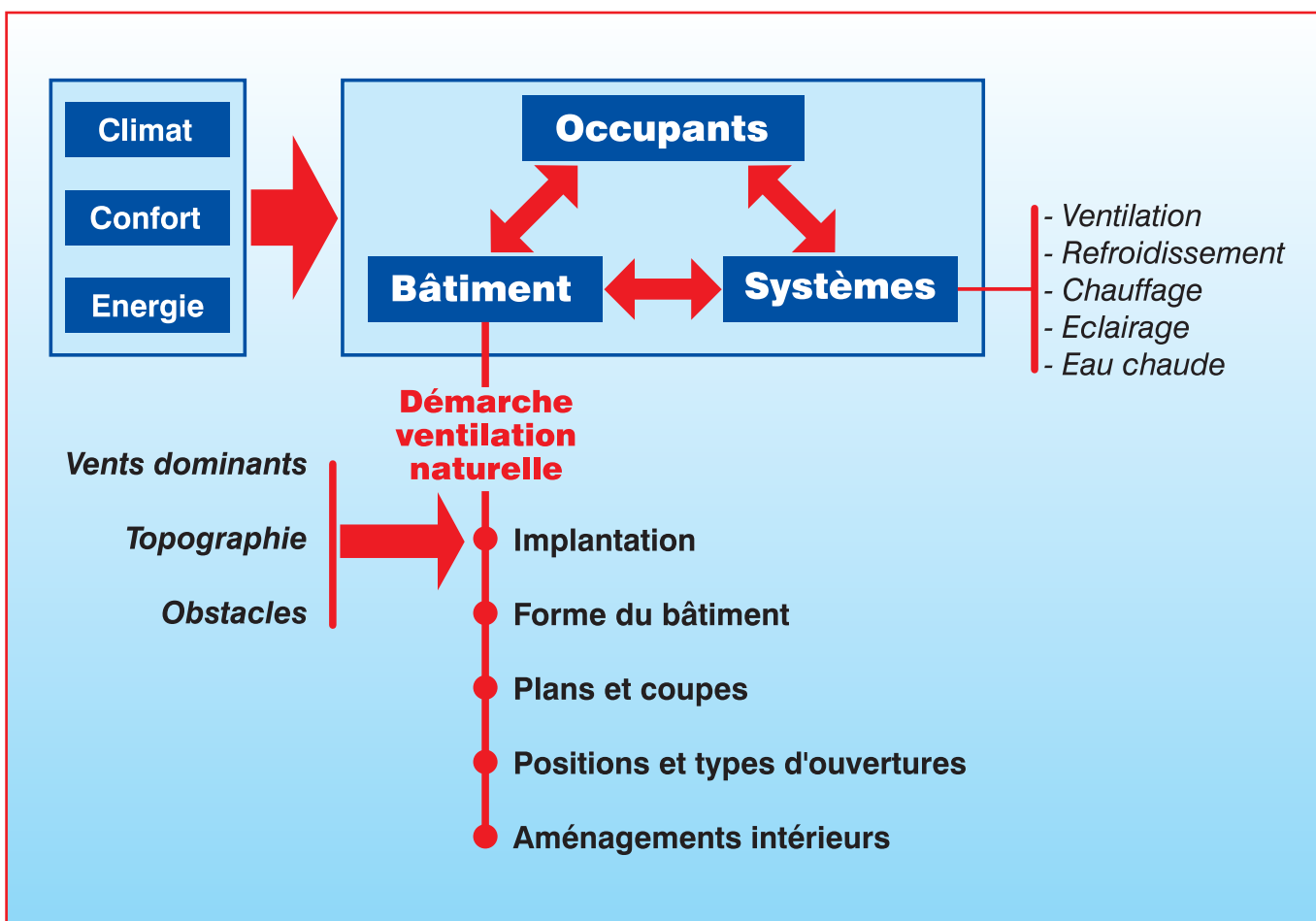
La prise en compte des potentiels du site, des vents dominants, de la topographie et des obstacles existants, engage vers une optimisation de la ventilation. Il est intéressant d'orienter les façades portant les ouvrants perpendiculairement aux vents dominants, et les pentes de toit face aux vents. Les pilotis laissent passer le vent en niveau bas des constructions. Ils évitent l'effet de masque et permettent de refroidir le sol du bâtiment la nuit. Les joues à 45° sous le vent sont à conseiller. La ventilation des combles assure le refroidissement nocturne du bâtiment.

Dès la conception, il est primordial de minimiser les cloisons pouvant entraver l'écoulement du vent. L'utilisation d'un puits central avec ouverture en toiture assure une ventilation efficace par effet de cheminée. Les ouvertures en hauteur diminuent la rencontre d'obstacles à l'air s'écoulant des fenêtres vers le puits central. L'air chaud, plus léger, a tendance à monter et à s'évacuer naturellement par la cheminée centrale.

La démarche de ventilation naturelle s'inscrit dans la conception globale du bâtiment : elle doit tenir compte des contraintes sociologiques, économiques et techniques.



Une démarche de ventilation naturelle nocturne. **1**



2 Proposition d'une démarche de ventilation naturelle.

La ventilation naturelle de l'air circule d'une zone de surpression vers une zone de dépression.

L'implantation perpendiculaire aux vents dominants des bâtiments parallélépipédiques et l'organisation traversante sont les éléments les plus propices à une bonne ventilation naturelle. Dans certaines régions, l'orientation des vents dominants est comprise dans un certain intervalle. Une orientation favorable pendant une saison peut l'être moins à une autre période de l'année.

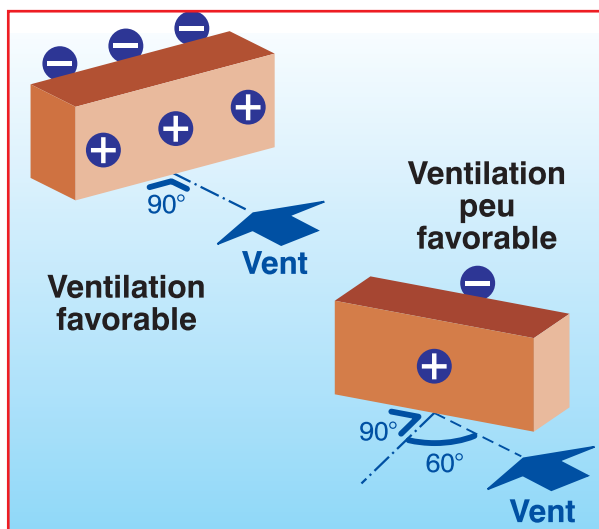
Les valeurs des champs de pression autour des bâtiments en U sont relativement constantes en dépit des variations d'incidence des vents. Cependant, la ventilation s'avère trop faible au niveau des deux angles du U. Il est important de veiller aux dimensions des extensions pour éviter les effets de masque néfastes à la ventilation des logements.

En comparaison avec la forme en U, lorsque l'incidence varie entre 30° et 60°, les différences de pression restent très intéressantes pour tous les logements du bâtiment en L, quoique cette configuration perde en efficacité dès lors que l'une des branches du L est parallèle au vent.

La Texas Engineering Experiment Station a, depuis plusieurs années, étudié le comportement de la ventilation traversante dans tous ses aspects. Cette étude a montré que :

- l'air en mouvement a une certaine inertie ; les filets d'air entrant dans le bâtiment ont donc tendance à garder la même direction ;
- la direction des filets d'air à l'intérieur d'un bâtiment est influencée par la répartition des pressions sur la façade exposée au vent et par la forme de l'orifice d'entrée du vent ;
- le mouvement de l'air dans une pièce doit être considéré aussi bien en plan qu'en coupe ;
- la hauteur du sous-plafond est sans influence sur le trajet de l'air ;
- le trajet du vent au travers d'une pièce n'est pas influencé par la vitesse du vent, mais seulement par la géométrie et l'existence des zones de haute et basse pression ;
- la vitesse de l'air à l'intérieur du bâtiment est proportionnelle à la vitesse du vent extérieur, le maximum étant donc obtenu avec le maximum d'ouvertures ;
- une vitesse de l'air à l'intérieur supérieure à la vitesse de l'air à l'extérieur peut être obtenue en utilisant des sorties d'air beaucoup plus grandes que les entrées. On place ainsi le bâtiment en sous-pression. Si on utilise le schéma inverse, l'accélération aura lieu à l'extérieur ;
- la position et la forme des débords de toiture et des auvents du côté des orifices d'entrée d'air ont une grande importance.

La ventilation traversante s'effectue de la façade en surpression vers la façade en dépression. Cette différence de pression est due au vent ou à un écart de température entre la façade ombragée et la façade ensoleillée.



Impact de l'incidence du vent sur l'efficacité de la ventilation traversante.

1



2 Rectorat des Antilles et de la Guyane. Schoelcher (Martinique) (arch. C. Hauvette et J. Nouel).

La protection face au soleil des espaces habités est essentielle au confort thermique. Pour bien intégrer ces protections au sein du bâtiment, il est nécessaire de comprendre les phénomènes géométriques et énergétiques de l'ensoleillement global. Celui-ci se décompose en **rayonnements directs, diffus et réfléchis**.

La densité du flux incident du **rayonnement solaire direct** au niveau d'une enveloppe est fonction de l'orientation des différentes surfaces de l'enveloppe, de la latitude et de la déclinaison du soleil. Il existe différentes méthodes d'évaluation de ces flux. Les techniciens utilisent généralement les diagrammes de courbes solaires polaires ou cylindriques ou encore les courbes mensuelles des ombres au sol d'un obstacle vertical. Des logiciels simulent les ombres projetées de bâtiments à différentes heures de la journée, pour différentes périodes de l'année et sous différentes latitudes. Ces outils constituent des aides précieuses à la conception.

Le **rayonnement diffus** provient des multiples réflexions du rayonnement solaire par les particules en suspension dans l'atmosphère. Cette diffusion est importante lorsqu'il y a une forte nébulosité (principalement en climat humide) et faible pour les ciels très clairs. La diffusion sur une surface horizontale sous "ciel clair" correspond à environ 10 % du rayonnement direct.

Le **rayonnement réfléchi** correspond aux réflexions par l'environnement des rayonnements directs et diffus. Il dépend principalement de la nature des surfaces. On parle par exemple de la réflectance du sable qui varie de 10 à 40 % selon la saison et la latitude.

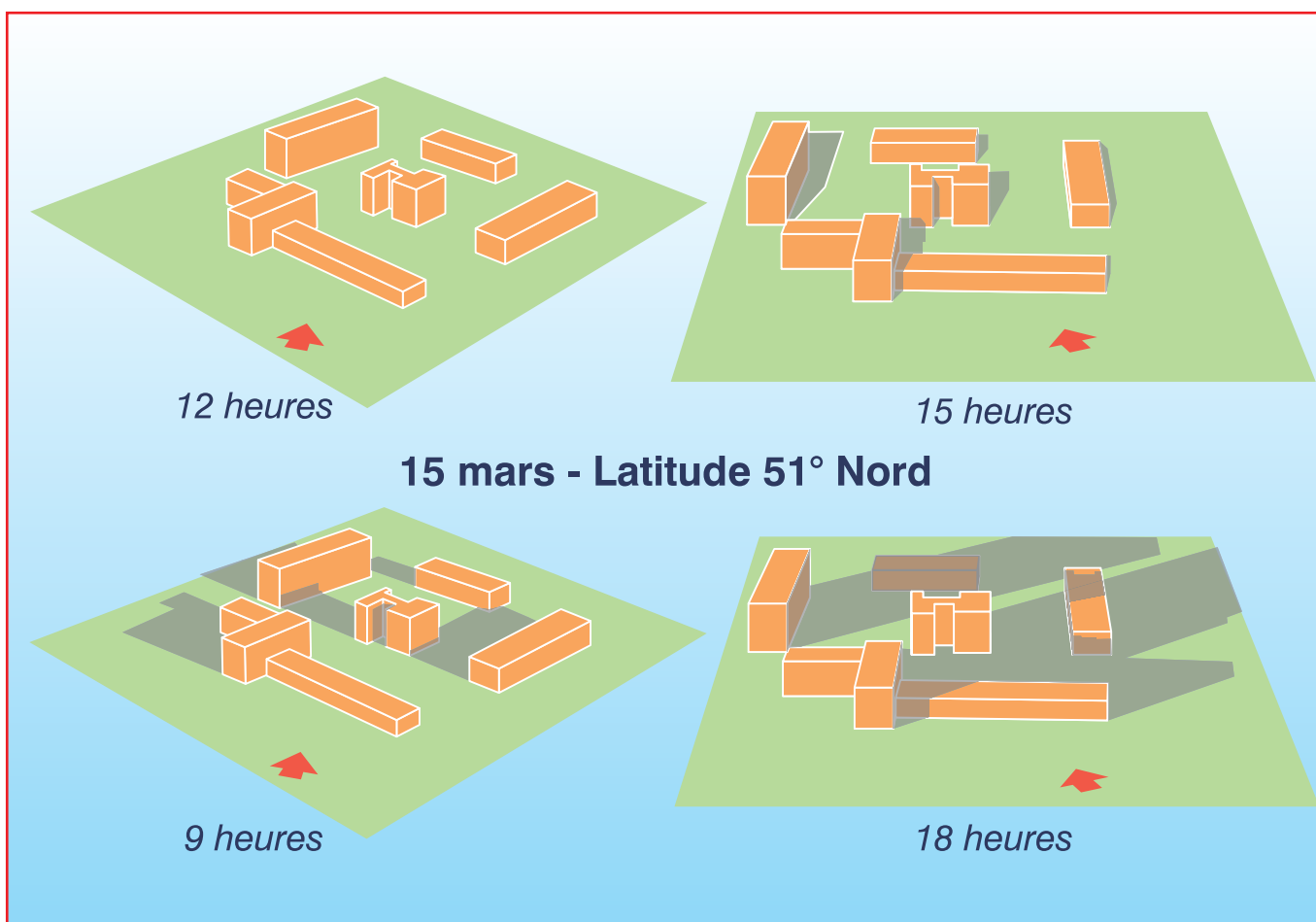
Les méthodes simplificatrices de dimensionnement de l'ensoleillement global moyen les plus courantes sont les diagrammes énergétiques universels. Ils permettent d'estimer la densité du flux qui atteint une surface ensoleillée. Selon la complexité de l'enveloppe, cette méthode peut s'avérer plus ou moins laborieuse.

Les outils de simulation informatique de l'ensoleillement global autour d'une forme bâtie rejoignent mieux les approches architecturales et urbaines. Ils livrent des résultats physiques synthétiques, que l'on ne pourrait obtenir par calcul manuel, dès la conception.

Afin de concevoir correctement l'enveloppe d'un bâtiment, il est nécessaire de connaître à tout moment l'énergie solaire effectivement reçue par celle-ci.



Ville d'Hadramaut (Yemen). **1**



2 Les logiciels informatiques de simulation de l'ensoleillement constituent des outils d'aide à la conception (*Logiciel OPTI - Architecture et Climat*).

Carl Mahoney a mis au point un ensemble de tables destinées à récapituler et à analyser les données climatiques. Ces tables permettent, à partir des caractéristiques climatiques d'une région, de proposer des typologies de plans de masse, de structures, de matériaux ainsi qu'un traitement des surfaces extérieures.

Dans les tableaux récapitulatifs des fiches correspondantes, il utilise des indicateurs qui signalent :

- H1 : que la circulation d'air est le facteur essentiel ;
- H2 : que la circulation d'air est souhaitable ;
- H3 : qu'il y a lieu de prendre des mesures de protection contre la pénétration des eaux de pluie ;
- A1 : qu'il convient d'emmagasiner de la chaleur ou de s'en protéger ;
- A2 : qu'il est souhaitable de prévoir un emplacement en plein air pour dormir. Ce besoin se fait sentir lorsque la température nocturne est élevée et lorsque le niveau d'humidité est faible ;
- A3 : que des précautions sont à prendre en saison froide. Ce cas se présente lorsque la température diurne ou nocturne descend en dessous de la température de confort.

Chaque table formule des recommandations liées à un climat. Ces préconisations ont trait aux caractéristiques du bâtiment et sont regroupées en 8 catégories comprenant, pour chacune d'entre elles, différentes caractéristiques.

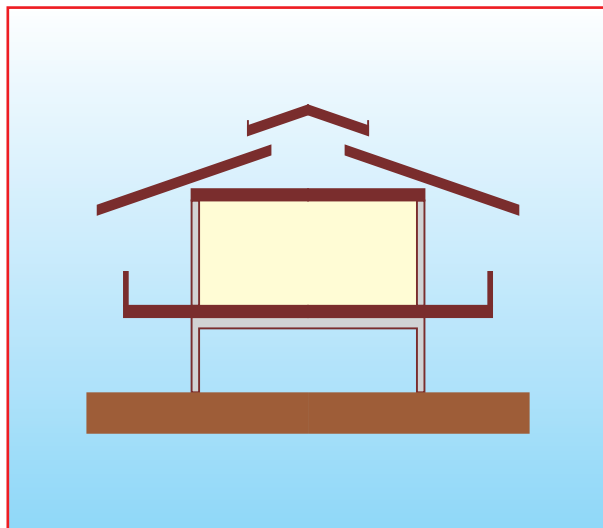
En climat équatorial, les conditions sont relativement uniformes le long de l'année. Les températures sont rarement très élevées (< 32 °C) et le vent reste léger.

L'essentiel des efforts vise à :

- se protéger efficacement du rayonnement solaire ;
- améliorer la ventilation ;
- abaisser le taux d'humidité relative.

Ainsi, la table de Mahoney indique les différentes recommandations à prendre en compte. Les bâtiments doivent être suffisamment espacés afin de laisser libre circulation à la brise. L'orientation doit suivre l'axe est-ouest de façon à réduire l'exposition au soleil des façades. Cela permet également aux vents dominants du sud-est ou du nord-est, suivant la saison, de pénétrer dans le bâtiment. On privilégie des baies aussi larges que possible afin de faciliter la circulation de l'air. Il faut pouvoir se protéger des pluies et des insectes. Etant donné le faible écart des températures entre la journée et la nuit, on privilégie les constructions à faible inertie afin de ne pas emmagasiner de la chaleur susceptible d'être une source d'inconfort accru pendant la nuit. La couverture sera de couleur claire ou revêtue d'une surface métallique brillante, de manière à réfléchir les rayons solaires. Une toiture comportant un vide d'air et une isolation en matériaux légers contribue à diminuer le passage de la chaleur solaire absorbée. Les circulations extérieures doivent être protégées de la pluie.

En climat équatorial, la conception du bâtiment doit favoriser la circulation de l'air et éviter l'accumulation de la chaleur. Les espaces de vie intérieur et extérieur seront abrités des pluies, et le bâtiment protégé des insectes.



Coupe de principe d'un habitat en climat équatorial. **1**

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de Belem (Brésil) (d'après C. Mahoney).

Ce type de climat est caractérisé par trois saisons distinctes : une très chaude et sèche, une saison chaude et humide, et enfin une saison fraîche et sèche. Les bâtiments seront donc le résultat d'un compromis entre les exigences contradictoires qu'implique un climat à caractère mixte.

Il est important d'orienter les bâtiments selon un axe est-ouest afin de diminuer les surfaces est-ouest les plus exposées aux rayons solaires bas. L'implantation peut être compacte et les pièces disposées en double orientation mais le plan doit permettre à l'air de circuler pendant les trois mois de la saison humide. L'espacement entre les bâtiments est nécessaire pour profiter de la brise qui souffle de l'est ou du sud-est pendant la saison humide. Il convient d'utiliser des volets pour se protéger du vent pendant la saison fraîche et des poussières pendant la saison torride et chaude. Les ouvertures sont de dimension moyenne, compromis entre le besoin d'ouverture pendant la saison humide et celui de se protéger pendant la saison torride et fraîche. On adoptera pour les murs et la toiture une construction lourde et massive en protection des températures extrêmes. L'accumulation de chaleur pendant la saison torride et sèche rendra indispensable la possibilité de dormir à l'air libre.

En climat tropical de mousson, la conception du bâtiment doit proposer une protection aux températures extrêmes et permettre la ventilation durant la saison humide.



Village traditionnel (Laos) 1

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de New Delhi (Inde) (d'après C. Mahoney).

Le climat tropical sec connaît trois saisons : la saison des pluies, la saison chaude et sèche et la saison très chaude. De manière générale, ce climat connaît des écarts journaliers de température importants.

Les indicateurs de la table de Mahoney montrent que le principal facteur à prendre en considération est le stockage de chaleur. Ainsi, il importe de nouveau d'orienter le bâti de manière à pouvoir se protéger des gains de chaleur conséquents à une exposition au rayonnement. Les dispositifs de ventilation doivent pouvoir être utilisés de manière intermittente, afin d'isoler au mieux le bâtiment pendant la saison très chaude, et de le ventiler. Etant donné les écarts importants de température entre la nuit et le jour, on privilégie les constructions massives au niveau des murs, et légères et isolées au niveau des toitures afin de conserver le plus longtemps possible le profit de la fraîcheur nocturne.

En climat tropical sec, les différences de températures journalières obligent à une conception basée sur l'inertie thermique. L'isolation thermique est assurée au niveau de la toiture.



Tapisserie représentant diverses activités en zone tropicale sèche. **1**

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de Bamako (Mali) (d'après C. Mahoney).

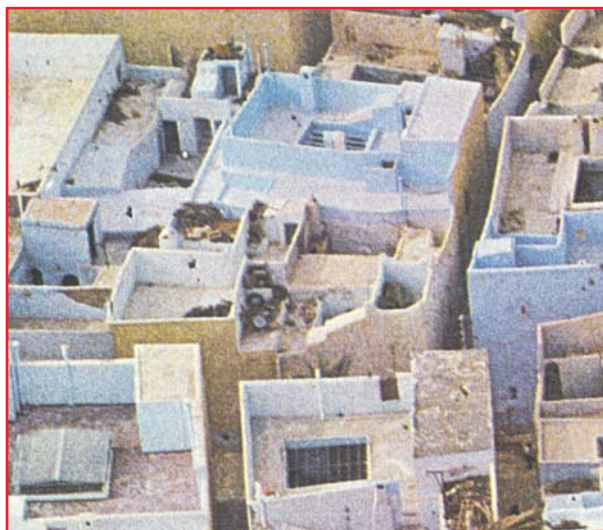
Ce climat se caractérise par deux saisons : une longue saison torride, pendant laquelle il ne pleut pas, et une saison froide de plus courte durée, pendant laquelle les averses sont occasionnelles. Toute l'année, le vent prédominant souffle du nord-ouest.

Le confort des habitants n'exige pas de circulation particulière d'air, étant donné le caractère sec du climat. Ainsi, la protection contre l'ensoleillement prime sur la ventilation. Il convient à toutes les saisons de disposer les habitations en groupes compacts autour de cours intérieures et de les répartir dans de nombreuses ruelles. Cette disposition peu favorable à la ventilation permet de protéger au mieux les bâtiments grâce aux ombres portées qu'ils projettent les uns sur les autres, l'objectif étant ici de créer le plus d'ombre possible. Les écarts de température étant importants entre la nuit et le jour, l'architecture locale privilégie des murs massifs et des toitures lourdes afin de conserver la chaleur du jour et de pouvoir la restituer aux heures les plus fraîches de la nuit.

En construction traditionnelle, on a recours à l'aspiration de l'air à travers des conduits à parois épaisses qui le canalisent, après son passage au-dessus de récipients de terre cuite remplis d'eau, vers les pièces situées au rez-de-chaussée et au sous-sol. L'air ainsi introduit dans les locaux est à la fois humidifié et rafraîchi par l'évaporation de l'eau des jarres. En climat sec, le rôle de l'eau est considérable pour le confort. Par son évaporation, elle n'assure pas seulement le rafraîchissement, mais également l'humidification de l'air, réduisant ainsi le transport et les infiltrations de particules de poussière et de sable.

Dans les maisons traditionnelles, différentes pièces sont utilisées selon les saisons. Pendant la saison chaude, les terrasses sont utilisées pour dormir la nuit, tandis qu'une cour ombragée et des pièces situées au rez-de-chaussée et entourées de gros murs servent au séjour diurne. Pendant la saison plus fraîche, le premier étage, où le soleil peut pénétrer, devient le lieu de séjour principal.

En climat désertique, les bâtiments peuvent être disposés en groupes compacts autour de cours intérieures ombragées. La massivité des murs et de la toiture assure l'inertie thermique.



Ville de la vallée du M'Zab (Sahara algérien).

1

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de Bagdad (Irak) (d'après C. Mahoney).

La situation d'altitude est à elle seule un facteur de changements climatiques : les températures sont plus basses que celles rencontrées dans une région située à la même latitude et, malgré une forte humidité ambiante, les écarts journaliers sont nettement plus importants. Les températures diurnes dépassent à peine la limite de confort et les nuits sont confortables, voire fraîches.

Il y a lieu d'orienter les bâtiments suivant un axe est-ouest afin de réduire l'exposition au soleil. On accepte des bâtiments à double orientation pourvu que les ouvertures intérieures permettent une ventilation transversale. Leur espacement ne représente pas un facteur critique, néanmoins, il faut que l'air puisse circuler dans une certaine mesure. Les baies sont de taille moyenne. On privilégie les murs et les toitures massives, qui atténuent les écarts journaliers importants de température en maintenant une certaine fraîcheur dans la journée et en emmagasinant de la chaleur pour les nuits, plus fraîches.

Dans un climat chaud d'altitude, il y a lieu d'orienter les bâtiments suivant un grand axe est-ouest, de prévoir des murs massifs et des toitures lourdes ainsi qu'une circulation d'air pendant les périodes de forte humidité.



Eastgate à Harare (Zimbabwe) 1
(arch. M.L.Pearce).

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de Nairobi (Kenya) (d'après C. Mahoney).

La proximité de la mer a pour effet de diminuer les écarts journaliers de température et de provoquer une humidité relativement importante. Les pluies apparaissent principalement pendant la saison froide et sont plus rares pendant la saison chaude.

En raison de l'humidité de la saison chaude, il est nécessaire de favoriser les mouvements d'air. Cependant, durant les mois plus froids, il faut pouvoir accumuler de la chaleur pendant les périodes les plus chaudes afin de la restituer aux heures les plus fraîches de la journée.

Au niveau du plan de masse, il est préférable d'orienter le bâtiment selon l'axe est-ouest afin de minimiser les surfaces exposées au rayonnement solaire bas, dont il est difficile de se protéger. Le caractère humide de ce climat invite, à certains moments de l'année, à recourir à une ventilation naturelle efficace. Cependant, durant la saison froide, il faut pouvoir occulter les dispositifs de ventilation dans une certaine mesure afin de conserver la chaleur. On peut toutefois s'écarter légèrement de cette orientation pour mieux profiter de l'ensoleillement matinal de l'est et de sa chaleur, qui sont bénéfiques pendant la saison froide. Il faut dès lors se protéger de la surchauffe que peut occasionner une telle orientation pendant la saison chaude par l'utilisation par exemple de pare-soleil verticaux ou de la végétation. Celle-ci peut en effet être un outil propice car ses propriétés changent au cours de l'année. A proximité des côtes, une telle orientation permettra également de profiter de la brise maritime fraîche.

Les baies de dimension moyenne ombragées par des pare-soleil horizontaux sur la façade sud permettent de profiter d'une ventilation efficace pendant l'été sans pour autant nuire aux apports du soleil bas pendant la saison froide.

La garantie d'une certaine inertie réside dans des murs et une toiture bien isolés. Il est également intéressant de pouvoir dormir dehors pendant la saison chaude. Une protection contre la pluie doit être prévue pour parer aux averses hivernales.

En climat méditerranéen, l'étude du plan-masse et le dimensionnement des ouvertures permettent d'optimiser la circulation de l'air. Les couleurs claires en revêtement de façade renforcent la protection solaire.



Première maison solaire passive française en Méditerranée (arch. M. Gerber).

1

INDICATEURS						RECOMMANDATIONS
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
						<p>Plan masse</p> <ol style="list-style-type: none"> orientation suivant un axe longitudinal E-O plan compact avec cour intérieure <p>Espacements</p> <ol style="list-style-type: none"> grands espacements entre les bâtiments idem avec protection contre le vent plan compact <p>Circulation d'air</p> <ol style="list-style-type: none"> circulation d'air permanente circulation d'air intermittente circulation d'air inutile <p>Ouvertures</p> <ol style="list-style-type: none"> grandes ouvertures des façades N et S très petites ouvertures (10 à 20 %) ouvertures moyennes (20 à 40 %) <p>Murs</p> <ol style="list-style-type: none"> murs légers murs massifs <p>Toitures</p> <ol style="list-style-type: none"> toitures légères et isolantes toitures lourdes <p>Sommeil en plein air</p> <ol style="list-style-type: none"> sommeil en plein air <p>Protection contre la pluie</p> <ol style="list-style-type: none"> protection contre la pluie

2 La table de recommandations pour le climat de Tel-Aviv (Israël) (d'après C. Mahoney).

La hiérarchie des espaces assure la transition entre le dehors et le dedans. En climat chaud, un certain nombre d'activités s'effectue en extérieur. Entre l'extérieur et l'intérieur se succèdent différents lieux, qui ont tous une fonction propre. On distingue, entre autres, les accès au bâtiment, les vérandas et les "espaces terrasses".

Les prochains chapitres traitent des différents espaces de transition. Leurs fonctions sont abordées des points de vue de l'organisation de la vie et de la protection des espaces intérieurs. L'amélioration du potentiel de ventilation et les dispositifs qui permettent de se protéger du soleil y sont examinés, ainsi que toutes les particularités liées à la topographie et aux différents climats.

La hiérarchisation des espaces assure la transition entre le dehors et le dedans. Les activités journalières se partagent entre les espaces extérieurs et les espaces intérieurs.



La rue publique, la rue piétonne, le jardin, la terrasse, le balcon... 1



2 Village traditionnel d'Afrique du Sud.

En climat humide, on cherche à obtenir des flux d'air réguliers qui brassent continuellement l'air des espaces habités. Lorsque l'implantation d'un bâtiment offre un potentiel de ventilation naturelle, il faut veiller à ce que la disposition des espaces intérieurs favorise un balayage régulier. Les écoulements traversants doivent rencontrer le minimum d'obstacles.

Certains éléments sont à prendre en considération :

- Le dimensionnement et l'emplacement des ouvertures en façade :

Les façades au vent et sous le vent gagnent à être poreuses. Elles doivent s'ouvrir directement sur les zones à irriguer. Les ouvertures en hauteur ont tendance à augmenter les écoulements au niveau du plafond au détriment des zones occupées par les habitants. La porosité des façades permet d'accélérer la ventilation par la création d'une zone dépressionnaire à l'intérieur du bâtiment.

- Le cloisonnement de l'espace intérieur :

Les espaces traversants et le cloisonnement parallèle aux flux favorisent la ventilation naturelle. Dans certains cas, la continuité des espaces et la transparence qu'elle induit peuvent limiter l'intimité. Dans le cas d'espaces non traversants, il est préférable que les cloisons posées perpendiculairement aux flux soient les plus poreuses possible. Les claustras, les lamelles réglables, les impostes, les allèges ajourées et les panneaux coulissants permettent une certaine porosité.

Les grandes hauteurs sous plafond dans les pièces de vie sont intéressantes du point de vue des échanges thermiques. Elles permettent aux volumes d'air chaud de s'éloigner des zones de vie et isolent les habitants des rayonnements du plafond. La hauteur sous plafond n'entrave pas la ventilation traversante, tant que les écoulements balayent tout le volume. L'absence de contremarches dans les escaliers facilite la circulation des fluides.

- Le positionnement du mobilier :

Les lits, tables, chaises, et autre mobilier autour duquel les habitants sont appelés à avoir une activité statique, doivent être placés dans les zones les mieux irriguées, et les armoires et autres mobiliers opaques le long des parois parallèles au flux. Cependant, le choix de l'emplacement du mobilier reste du ressort des habitants et de leur appropriation de l'espace.

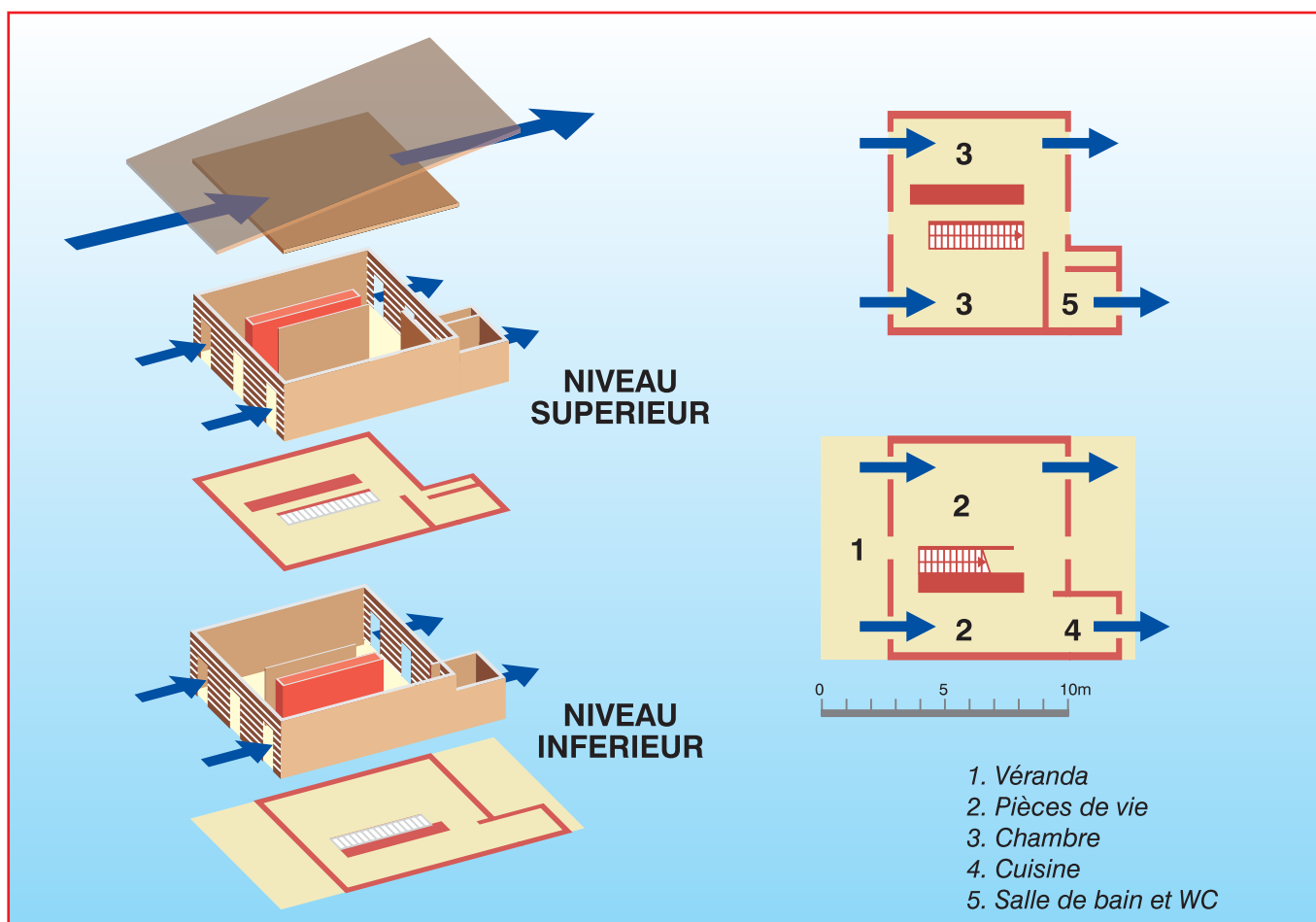
- La répartition des pièces en fonction du traitement de l'air vicié :

Les pièces de représentation, telles que les loggias, les salons, les chambres, sont situées du côté de la façade au vent. Elles échappent ainsi à l'air vicié des autres pièces. Les pièces produisant l'air humide et chaud sont placées au niveau de la façade sous le vent afin que leur volume d'air soit directement rejeté vers l'extérieur.

Une bonne conception de l'habitat permet d'optimiser la circulation de l'air. Les obstacles à l'écoulement de l'air seront évités, et la ventilation intensifiée dans les zones de vie.

- ☞ les cloisons et les façades pleines sont parallèles aux écoulements,
- ☞ les cloisons perpendiculaires aux écoulements sont perméables,
- ☞ l'escalier n'a pas de contremarches,
- ☞ les emplacements des personnes correspondent aux zones les mieux irriguées,
- ☞ les pièces humides donnent sur la façade sous le vent.

Recommandations. **1**



2 Plans et axionométrie éclatée d'un exemple de logement en duplex traversant (F. Bonneaud).

En immeuble collectif, le hall d'entrée est un espace de regroupement. Dans certains cas, il disparaît derrière la privatisation des accès à l'habitat.

La rentabilité économique conduit souvent le concepteur à réduire autant que possible l'espace du palier. Certains paliers de grande dimension et ouverts sur l'extérieur permettent pourtant la desserte de logements traversants. En prolongement de l'entrée dans le bâtiment, le palier devient un espace appropriable par les habitants.

Les espaces collectifs ont une influence sur les notions de sociabilité, d'entraide et de soutien. Le traitement du thème des accès comme espaces de rencontre, espaces collectifs et appropriables est intéressant. L'appropriation de ces lieux varie considérablement d'un espace culturel à un autre et implique nécessairement une prise en compte affinée des pratiques locales.

**Les accès mènent
aux seuils des
logements.
Ces espaces de
rencontre et de
desserte occupent
dans certaines cultures
une place très importante.**



Maison Martz - Besson Abymes (Guadeloupe) (arch. L. Martz) **1**



1	2
3	4



- 2** 1. Delta du Mekong à Chan Doc (Vietnam). 2. Habitat collectif à Mayotte (Comores).
3. Palais en terre à Diriyah (Arabie Saoudite). 4. Village traditionnel (Nigéria).

En climat tropical humide ou équatorial, les espaces intermédiaires, tels que les balcons, les loggias, les coursives, les vérandas, les galeries, sont des dispositifs courants. Ils deviennent incontournables et permettent, par le jeu des pans successifs, de maîtriser l'ambiance d'un contexte climatique éprouvant.

Ces espaces, en premier lieu, protègent du rayonnement solaire et constituent des endroits très ventilés. Ils offrent également une protection à la pluie. Les successions de cloisons permettent de varier les perméabilités de la ventilation naturelle à l'intérieur de l'habitat.

Ces lieux de vie où l'on passe une partie de la journée dégagent une ambiance confortable. On peut y cuisiner, y dormir, y recevoir... Les pratiques qu'ils accueillent dépendent fortement du contexte culturel local.

Les conditions climatiques de ces espaces intermédiaires varient en fonction de l'orientation et de la latitude du site, de l'heure de la journée et de la

A l'est, ces espaces reçoivent un fort ensoleillement durant les premières heures de la matinée. Ils sont à conseiller en climats sans risque de surchauffe matinale, à éviter dans les autres, à moins d'installer des écrans solaires verticaux, mais ces protections risquent d'entraver la ventilation naturelle à l'intérieur du logement quand les vents dominants sont d'est ou d'ouest.

A l'ouest, ces espaces ne captent les rayonnements solaires qu'en fin d'après midi. Durant la journée, les masses de grande inertie perdent la fraîcheur qu'elles ont emmagasinés durant la nuit. De nouveau, des protections solaires extérieures permettent de se protéger du soleil bas d'ouest, mais présentent le désavantage de freiner la ventilation naturelle intérieure originaire d'un vent d'est

Les orientations nord et sud sont plus faciles à protéger de l'ensoleillement direct, étant donné que le soleil y est le plus haut de la journée. Plus on s'éloigne de l'équateur dans l'hémisphère nord, plus le soleil au zénith est bas et pénètre en oblique dans les espaces intermédiaires orientés au sud. Dans l'hémisphère sud, ce sont les espaces orientés au nord qui sont exposés au soleil de midi. Au niveau de l'équateur, l'orientation de ces espaces dépend de la saison.

Les hauteurs, les débords ou les profondeurs des auvents, des vérandas, des balcons, des loggias, se dimensionnent en fonction de leur orientation et de la résistance thermique de chaque cloison à protéger. Du choix des couleurs des parois ainsi que des matériaux dépendent l'augmentation de leur réflexion et donc la diminution de l'absorption de chaleur.

La véranda, très courante dans les climats tropicaux humides et équatoriaux, prolonge les espaces intérieurs. Elle permet la vie extérieure à l'abri de la pluie et du soleil.



Maison Schoeron - Saint Laurent du Maroni (Guyane française) (arch. B. Castieao).

1



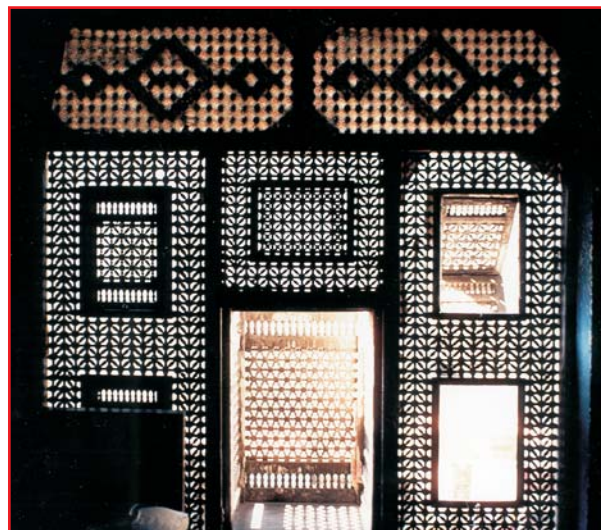
2 Véranda d'une maison (Afrique du Sud).

La capacité d'une paroi verticale à être traversée par les écoulements d'air se caractérise par sa porosité. La porosité de la surface augmente avec les possibilités d'infiltration d'air.

En climats désertique et méditerranéen, les façades de l'habitat sont traditionnellement peu poreuses. En climat désertique, il faut pouvoir se protéger de l'air trop chaud, source d'inconfort, mais également des poussières et du sable qu'il peut transporter. En climat méditerranéen, un compromis est nécessaire entre la ventilation en période estivale et la protection contre les infiltrations de l'air froid en période hivernale.

En climat chaud et humide, un certain niveau de porosité assure une ventilation suffisante. La porosité des parois peut atteindre un taux de 40 à 50% en sites faiblement ventés ou d'orientation défavorable à la ventilation naturelle. De telles porosités correspondent à des façades pourvues de grandes ouvertures et à cloisons très poreuses. Il est recommandé d'utiliser des ouvertures dans les troisième et quatrième façades afin d'améliorer la capacité de ventilation naturelle du logement. Leur positionnement doit être étudié. Il est préférable de les placer du côté de la façade sous le vent afin de créer à l'intérieur du logement une zone dépressionnaire plutôt que l'inverse. Pour la même raison, il faut que la porosité de la façade sous le vent soit plus importante que la façade au vent. Le taux minimum de porosité est de 25%. Les ouvertures verticales doivent être protégées des pluies obliques par des débords.

La capacité d'une paroi à être traversée par les écoulements de l'air se caractérise par sa porosité. Celle-ci est un des facteurs déterminants du balayage aéraulique des espaces intérieurs.



Moucharabiehs d'une maison du Caire (Egypte).

1

7 %



1

53 %



3

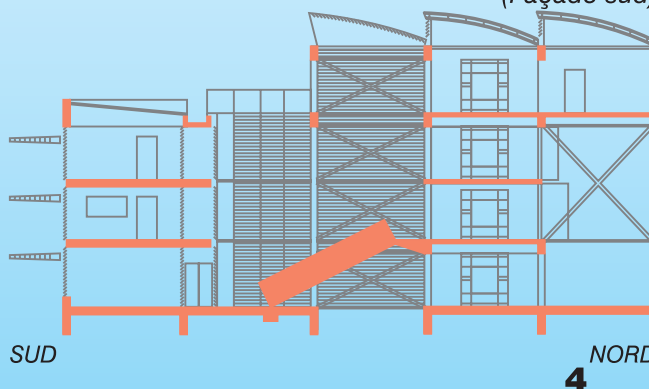
$$\text{Porosité} = \frac{\text{Surface des ouvertures à l'air}}{\text{Surface totale}}$$

31 %



2

61 %
(Façade sud)



4

- 2 1. Château el Kharana du désert (Jordanie). 2. Maisons méditerranéennes (France). 3. Maisons urbaines (Singapour). 4. Rectorat de l'académie des Antilles et de la Guyane (Martinique) - coupe N-S (arch. C. Hauvette et J. Nouel).

Par définition, un habitat est un lieu de vie qui offre des protections vis-à-vis de l'environnement extérieur, tout en profitant des avantages qu'il peut lui offrir.

Ces protections sont de plusieurs ordres :

- la protection de l'intimité des espaces intérieurs ;
- la protection face aux agressions, au vandalisme, aux animaux domestiques et sauvages ;
- la protection face aux forces de la nature, comme les ouragans et les séismes ;
- la protection face aux conditions climatiques extrêmes ;
- la protection contre les insectes.

Les prochaines fiches détaillent les différentes protections envisageables, ainsi que les méthodes auxquelles elles recourent.

Les besoins de protection sont ressentis en fonction du contexte culturel et local, mais également de la sensibilité des habitants.

La protection contre les moustiques tient une place considérable, car ils transmettent de nombreuses maladies. Les souches microbiennes de ce type de maladies diffèrent d'une région à l'autre. Certaines peuvent être mortelles, d'autres se soignent.

Il existe plusieurs moyens de se protéger des moustiques :

- éloigner les eaux stagnantes (marécages, flaques,...) ;
- porter des vêtements qui protègent les jambes et les bras ;
- protéger les ouvertures de l'habitat par des moustiquaires ;
- planter à proximité des zones de vie des plantes odorantes qui éloignent les moustiques, par exemple de la citronnelle ;
- les moustiques fuyant les zones froides, un climatiseur mécanique convenablement installé peut aussi constituer un bon moyen de protection.

L'habitat doit répondre à différentes exigences de protection vis-à-vis du monde extérieur :
la vue,
le bruit,
l'effraction,
les rongeurs,
les moustiques...



Palais en terre de Diriyah **1**
(Arabie Saoudite).



2 Village lacustre de Ganvié (Bénin).

La protection des parois extérieures a pour objectif d'arrêter, de freiner et de réfléchir les flux solaires.

Plusieurs dispositifs peuvent être mis en œuvre :

- le recul de la façade et des débords de toiture ;
- les pare-soleil horizontaux ou verticaux ;
- les réflecteurs ;
- les matériaux ou revêtements réfléchissants ;
- les matériaux isolants ;
- d'autres systèmes, comme les parois double peau.

Le choix des matériaux et des dispositifs architecturaux appelle, en premier lieu, à considérer, pour chaque paroi, l'environnement extérieur, les coutumes locales et les usages de l'espace intérieur.

Dans les logements sous toiture, 25 % des apports solaires thermiques sont transmis par les façades. Pour les logements en étage intermédiaire, ce taux atteint 50 %. On comprend dès lors l'importance de la protection des façades les plus exposées au soleil.

Les murs est et ouest reçoivent le soleil bas de la matinée et de la fin de journée. Les façades nord et sud reçoivent principalement un rayonnement solaire diffus. Plus la latitude du site augmente, plus la part du rayonnement direct augmente. Différents dispositifs existent pour protéger les parois extérieures des rayonnements en fonction de leur orientation mais également de leur position

Le recours à l'isolation est également un moyen de protéger les parois. Dans les climats humides, une petite isolation thermique est préférable. L'inertie est à éviter dans le cas d'un usage d'habitation, étant donnée la faible amplitude thermique journalière. Dans les climats secs, la résistance thermique et l'inertie deviennent essentielles surtout pour les peuples nomades.

La protection des parois extérieures a pour objectif d'arrêter, de freiner et de réfléchir les flux solaires. A cet effet, écrans, revêtements réfléchissants et matériaux d'isolation peuvent être mis en œuvre.



Bibliothèque départementale - Basse terre (Guadeloupe) (arch. V. Vaudou).



2 Différents types de protection d'une même façade (Sénégal).

Les pare-soleil protègent les murs des rayonnements solaires. Ils sont de deux types : horizontaux ou verticaux. Les pare-soleil verticaux offrent une protection efficace contre les rayonnements solaires bas, de l'est ou de l'ouest. Les parois orientées dans cette direction ne peuvent être protégées par les pare-soleil horizontaux, peu efficaces pour l'ensoleillement bas. La végétation peut être une source d'ombre projetée et filtrée sur une façade. Elle présente l'avantage d'adapter son efficacité aux besoins de la saison par la modification de son feuillage.

Les pare-soleil verticaux absorbent la chaleur à l'extérieur et ne la transmettent que partiellement en déphasage. Ce type de dispositif est d'autant plus efficace qu'il est de couleur claire, décollé de plus de 20 cm du mur et ouvert à ses extrémités supérieure et inférieure pour assurer une ventilation par convection.

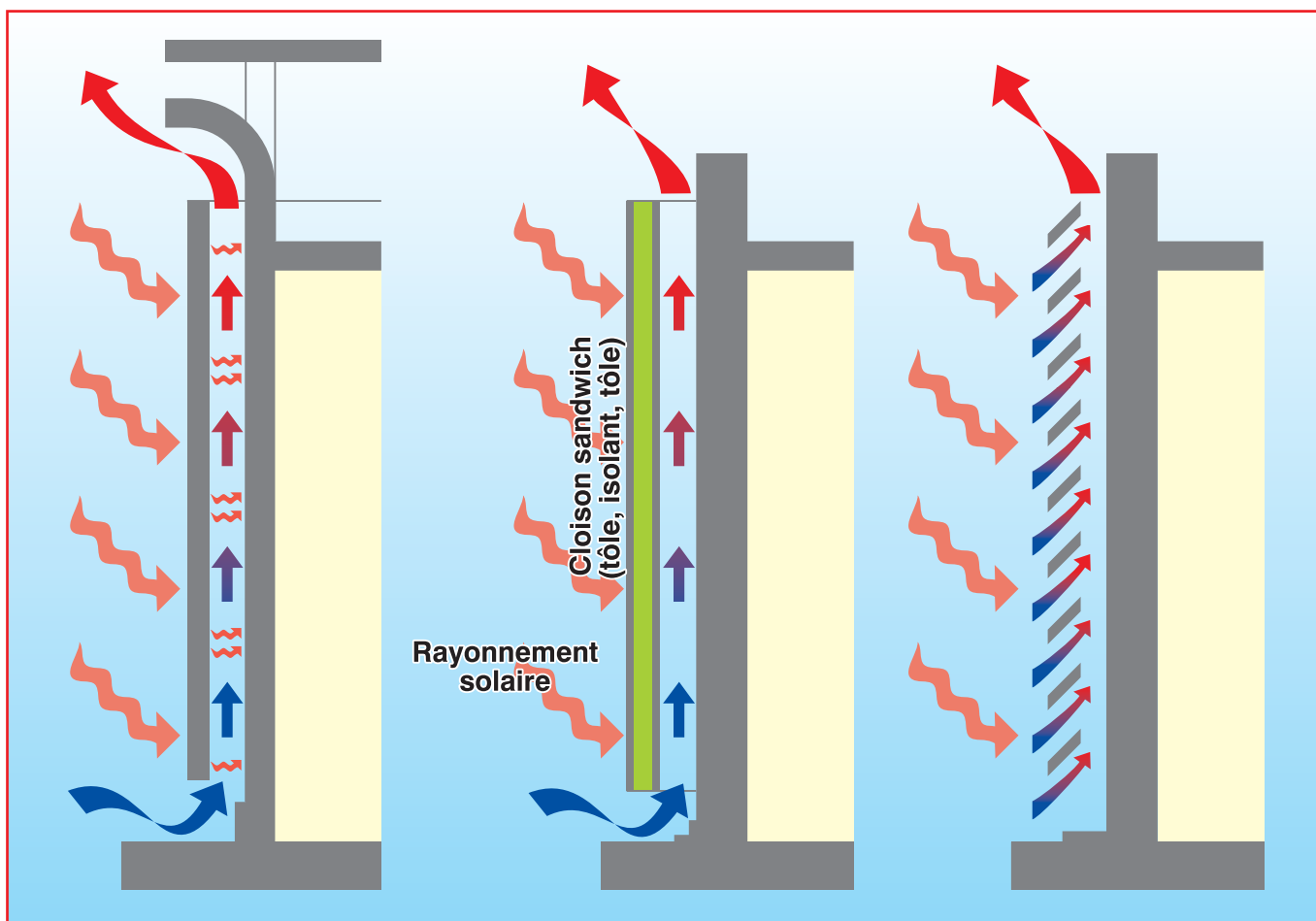
Comme l'illustre le schéma de la fiche, il existe trois sortes de pare-soleil verticaux. Le pare-soleil espacé du mur d'une certaine distance subit l'influence du rayonnement solaire et s'échauffe. Dans le premier cas de figure, la paroi transmet par radiation sa chaleur à la couche d'air entre le pare-soleil et le mur. Le vide créé va permettre d'évacuer cette chaleur par radiation : l'air chaud va en effet monter et laisser place à de l'air plus frais. Ainsi, la couche d'air joue un rôle de tampon et limite la transmission de chaleur au mur qui est protégé du rayonnement direct. Dans le deuxième cas de figure, le pare-soleil est une paroi isolante et transmet donc moins de chaleur au vide d'air. Le troisième exemple illustre le fonctionnement d'un système de lattes horizontales placées devant un mur. Le mur est protégé du rayonnement solaire direct. La couche d'air permet d'évacuer la chaleur par radiation. Dans ce cas, l'air peut entrer tout le long de la paroi et s'évacue dans sa partie haute.

Les pare-soleil verticaux protègent les murs extérieurs de l'ensoleillement direct. Ils permettent une ventilation par convection le long de la paroi extérieure du bâtiment.



Façade d'entrée de la cour d'appel de Niamey (Niger)
(arch. C. et L. Mester de Parajd).

1



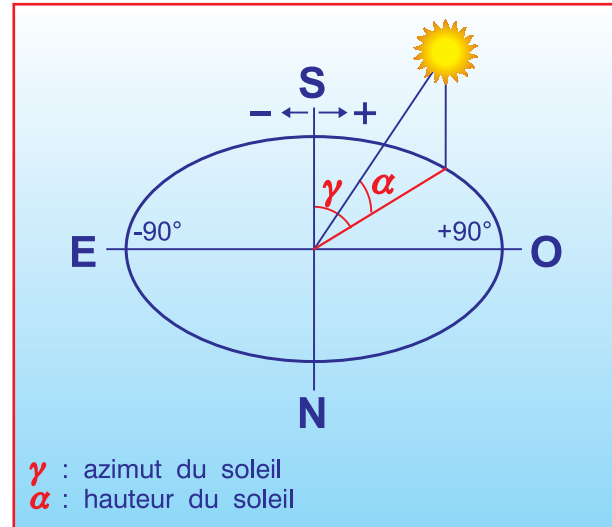
2 Typologies de pare-soleil verticaux.

L'efficacité des pare-soleil horizontaux dépend fortement de leur orientation. Ils permettent de protéger les surfaces du rayonnement solaire et évitent ainsi aux façades d'emmagasiner de la chaleur et de provoquer une surchauffe intérieure par rayonnement des parois. Plus le soleil est haut, plus les pare-soleil sont efficaces. Ils sont préconisés pour les façades orientées nord ou sud.

Ils assurent une protection en absorbant et réfléchissant une partie du rayonnement solaire. Ils ne permettent pas seulement de protéger des façades, mais aussi des rues entières, comme lors de l'exposition universelle de Lisbonne. Ils réduisent également la luminosité à l'intérieur de locaux en protégeant les fenêtres du rayonnement. Ils protègent enfin des pluies, laissant la possibilité d'ouvrir les fenêtres même en saison humide. Ils peuvent couvrir toute la longueur du mur ou simplement une partie, ou même, dans certains cas, uniquement les fenêtres, mais cette dernière option leur fait perdre en efficacité.

De manière générale, pour la qualité de l'intégration, de l'esthétique et de l'efficacité, il vaut mieux les prévoir au stade de la conception du bâtiment que les installer après-coup sur une façade déjà existante. Leur efficacité dépend à la fois de l'orientation de la façade et de leur dimensionnement. Le soleil n'ayant pas la même hauteur à différentes heures de la journée, à différentes périodes de l'année et sous différentes latitudes, une première étape consiste à définir quelles sont les surfaces à protéger, quelles orientations ont ces surfaces, à quelle période de l'année et de la journée l'efficacité maximale est attendue et quelle partie de la surface est à protéger. A partir de ces considérations, on peut calculer la bonne profondeur des pare-soleil.

Les pare-soleil horizontaux permettent l'ombrage des façades orientées au midi. Ils sont inefficaces sur les façades orientées à l'est et à l'ouest.



Les coordonnées du soleil permettent de calculer les caractéristiques géométriques des pare-soleil horizontaux. **1**



2 Exposition universelle de Lisbonne (Portugal).

Un "light-shelf" est un élément réflecteur. Plat courbé, horizontal ou légèrement incliné, il peut être disposé de part et d'autre de la paroi. Sa fonction est de rediriger la lumière naturelle vers le plafond en protégeant l'occupant des pénétrations directes du soleil. Le light-shelf est généralement placé au-dessus du niveau de l'œil. Il doit rendre possible la vue vers l'extérieur tout en évitant l'éblouissement.

Le réflecteur est conçu spécifiquement en fonction de l'orientation de la fenêtre, de la configuration de la pièce et de la latitude. Le choix du type de light-shelf (intérieur (c), extérieur (a) ou combiné (b)) et de sa profondeur résulte d'un compromis entre les demandes d'éclairage naturel et les besoins d'ombrage. En intérieur, ce dispositif réduit la quantité de lumière reçue. Situé à l'extérieur, il offre une surface ombrée proche de la façade. Cette option réduit le niveau d'éclairement à proximité de la fenêtre et améliore l'uniformité de l'éclairage naturel au travers du local. Le fait d'incliner le light-shelf peut soit réduire la quantité de lumière pénétrant dans le local et augmenter la zone d'ombre (d), soit augmenter la pénétration de lumière dans le local tout en diminuant la surface ombrée (e).

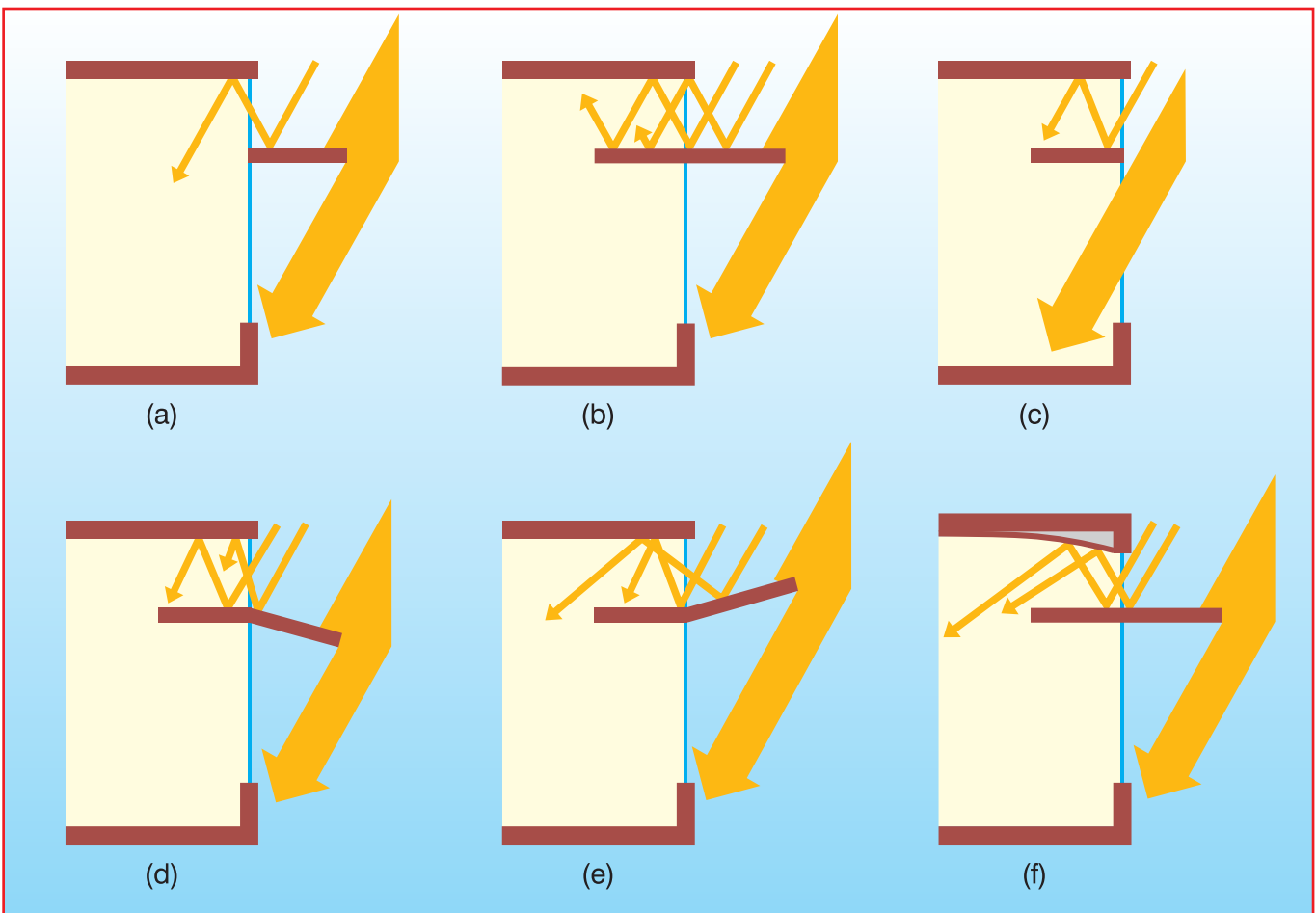
Le plafond influence les performances du light-shelf car la lumière y est réfléchi avant d'être diffusée vers le local. Les caractéristiques du plafond sont la finition (plus ou moins lisse), laquelle définit le degré de specularité, la couleur et la pente. Une surface spéculaire réfléchit plus de lumière dans le local et augmente les risques d'éblouissement. La distribution de la lumière réfléchi par un light-shelf dépendra aussi de la pente du plafond. Un plafond incliné ou de forme arrondie incurvée vers l'intérieur du local (f) augmentera très fortement la profondeur de pénétration de la lumière dans le local.

Les réflecteurs permettent de bloquer la pénétration des rayons directs à tout moment de la journée et de l'année, et d'augmenter les niveaux d'éclairage naturel jusqu'à 10 m de la fenêtre. Cependant, leur utilisation est à proscrire sous certains climats.

Les réflecteurs sont des éléments de construction qui réfléchissent la lumière naturelle à l'intérieur des locaux, ils permettent également d'ombrager les surfaces vitrées.



Réflecteurs du Laboratoire d'Énergie Solaire (LESO) de Lausanne (arch. D. Pagadaniel).



2 Typologies de réflecteurs.

Une partie du rayonnement solaire irradiant une paroi est absorbée et l'autre est réfléchi. La partie absorbée est transformée en chaleur et accumulée dans la masse du matériau. La capacité de réflexion d'un matériau dépend de sa couleur. Plus la couleur est claire, plus la réflexion est importante. A l'inverse, plus la paroi est sombre, plus grande est la capacité d'absorption. En climat chaud, les couleurs claires en façade participent donc de la protection solaire du bâti.

Le coefficient d'absorption α est le rapport entre l'énergie solaire absorbée et l'énergie solaire incidente. La valeur de α varie de 0 à 1 ; elle dépend de la couleur. Plus la couleur est sombre, plus α tend vers 0,9. Une couleur claire correspond, au mieux, à un α égal à 0,2. Enfin, une surface réfléchissante, comme celle de l'aluminium neuf, a un facteur d'absorption voisin de 0,1.

Qu'il s'agisse de moisissures, de salissures ou de vieillissement naturel, de nombreux matériaux s'assombrissent avec le temps. Ces altérations des parois augmentent leur absorption du rayonnement solaire. Dès la conception d'une toiture claire, il faut donc prévoir une augmentation dans le temps de son coefficient d'absorption α .

Le tableau présente les coefficients d'absorption α pour différents matériaux. Pour les matériaux non mentionnés, une valeur approchée peut être déterminée en fonction de la couleur (surfaces lisses, unies)

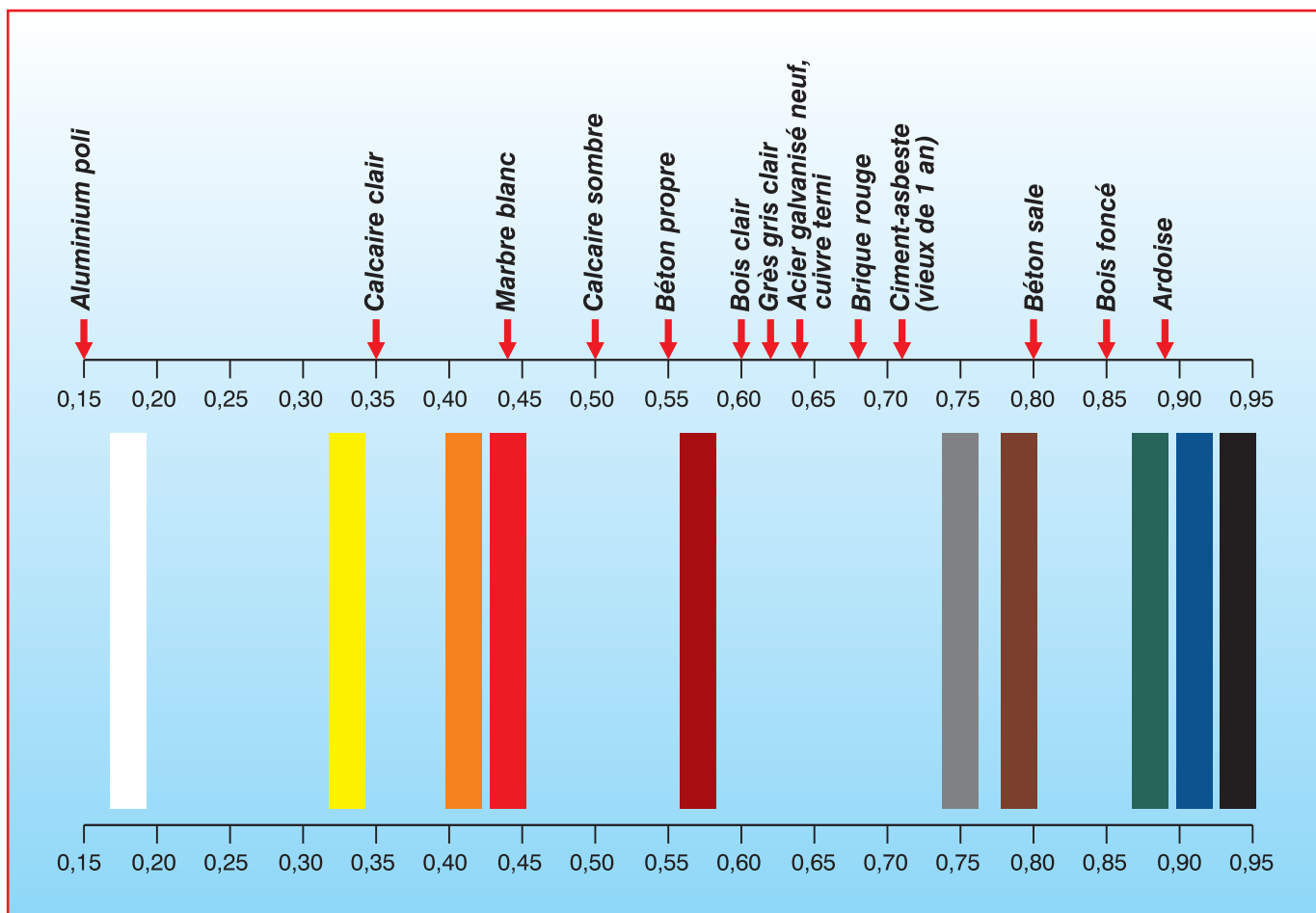
Les risques de réflexion des parois verticales claires (éblouissements, réflexion du flux solaire) sont à prendre en compte. Un mur ouest peint en blanc réfléchit 70 à 80 % du rayonnement solaire reçu ; ce rayonnement peut ensuite frapper une façade qui, par son orientation, était à l'abri du rayonnement solaire.

Le coefficient d'absorption exprime le rapport entre l'énergie solaire absorbée et l'énergie solaire incidente. Les couleurs claires offrent une meilleure protection des parois au soleil.



Village méditerranéen à Collioure (France).

1



2 Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs.

Deux corps portés à températures superficielles différentes échangent, à travers l'air ou le vide, de la chaleur par rayonnement thermique de grande longueur d'onde.

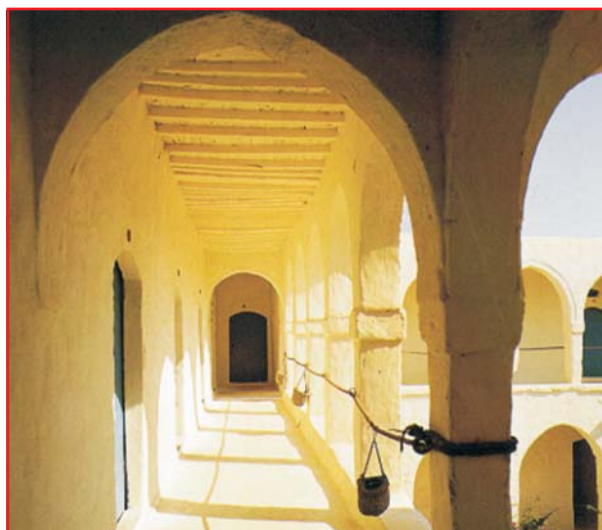
Si le corps n'est pas homogène, seule intervient l'émissivité de la surface. Le coefficient d'émissivité d'une surface à une température donnée est fonction de son état de surface et, dans le cas d'un métal, de son degré d'oxydation. Cette grandeur sans dimension varie de 0 à 1. Dans de nombreux cas, le coefficient d'émissivité des matériaux de construction est supérieur à 0,8. Les matériaux brillants ont, au contraire, une émissivité très faible.

Le tableau présente les facteurs d'émissivité et d'absorption pour différents matériaux utilisés dans la construction. Les peintures claires absorbent une fraction assez faible du rayonnement solaire visible. Un mur peint en clair et exposé au rayonnement solaire absorbe relativement peu de chaleur. Il rayonne la plus grande partie absorbée sous forme de rayonnement secondaire de grande longueur d'onde. Sa température superficielle reste voisine de celle de l'air ambiant. Le badigeon à la chaux présente des propriétés remarquables de ce point de vue.

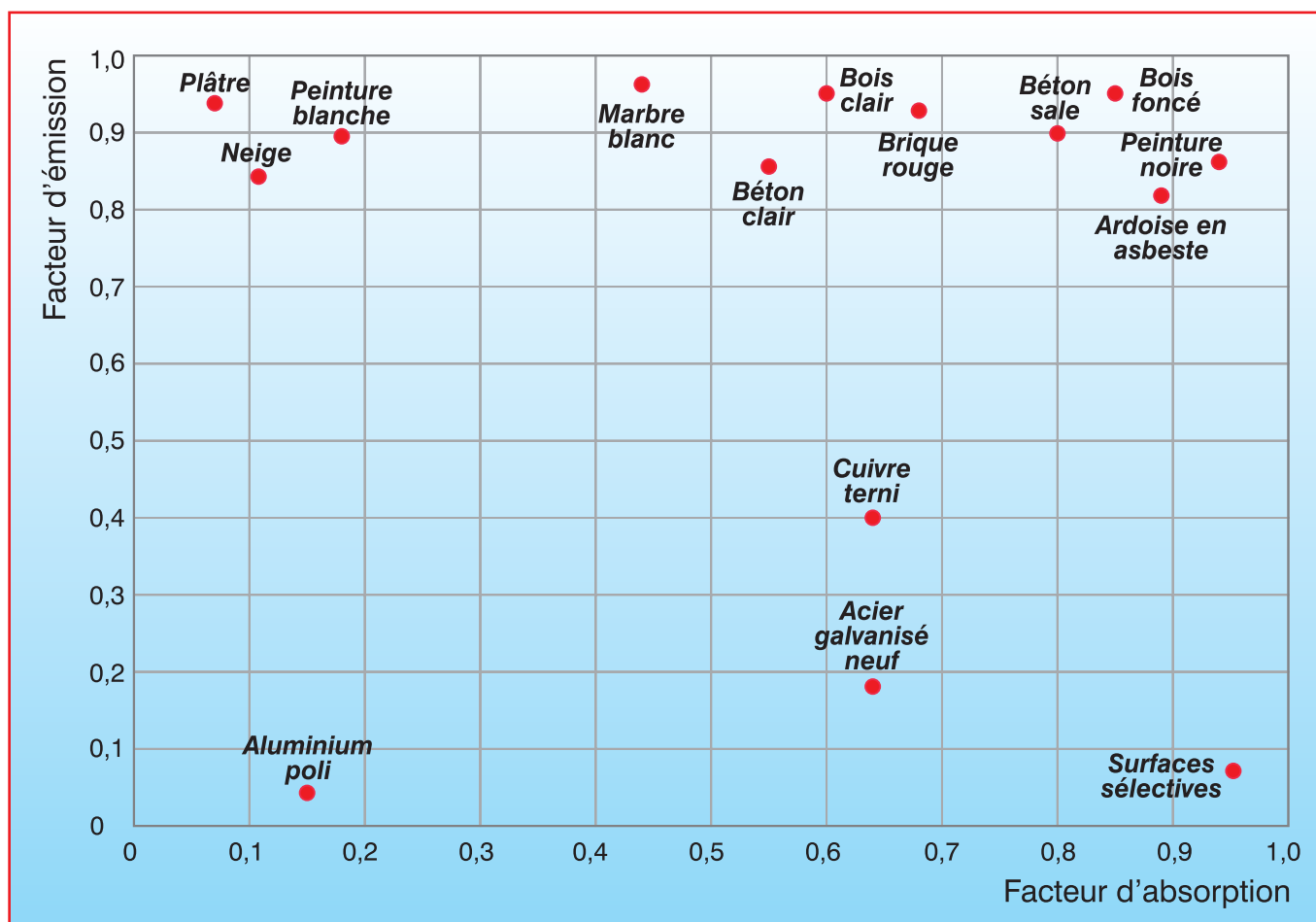
L'aluminium perd beaucoup de son efficacité une fois oxydé. La peinture à l'aluminium a une émissivité beaucoup plus élevée que l'aluminium sous forme de métal. Cette qualité est attribuée à la composition des huiles ou des matières synthétiques de support. L'aluminium brillant absorbe relativement peu de rayonnements solaires ; il ne rayonne qu'une très faible partie de la chaleur absorbée. Sa température superficielle tend à être plus élevée que celle d'une surface recouverte d'un badigeon à la chaux.

La sous-face d'une plaque en aluminium utilisée en toiture rayonne très peu de chaleur vers le bas et possède ainsi, en tant que matériau de couverture, des propriétés remarquablement adéquates aux climats chauds. Mais, lorsque sa face inférieure se trouve directement en contact avec d'autres matériaux, il transmet alors par conduction la chaleur reçue.

L'émissivité d'un corps est l'énergie rayonnée à une température donnée par unité de temps et de surface. Elle est indépendante de la couleur du corps.



Ombrage et enduit blanc sur construction massive (Tunisie). **1**



2 Facteurs d'émission et facteurs d'absorption pour différents matériaux (Archi bio - Parenthèses - 1979 - J.L. Izard).

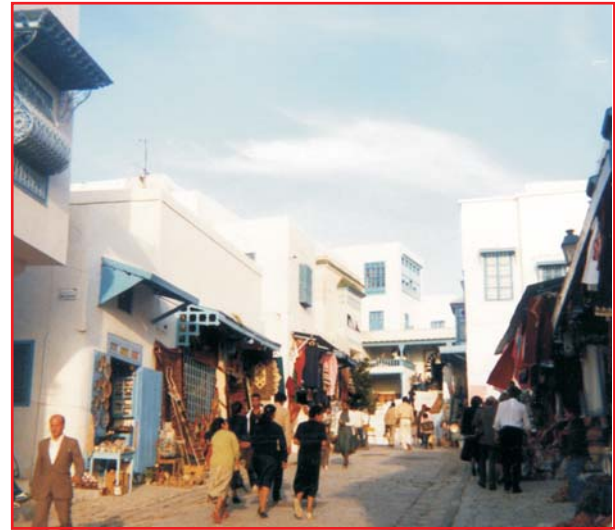
Les auvents sont des protections solaires horizontales. A la différence des pare-soleil horizontaux, ils sont inclus dans la structure du bâtiment. Le pare-soleil peut être constitué de lamelles et participer à un filtrage du rayonnement ; l'auvent, quant à lui, est opaque. Le pare-soleil, étant amovible, présente le double avantage de pouvoir n'être utilisé qu'à certains moments et d'être mis à l'abri en cas de fortes tempêtes ou d'ouragan, aussi n'est-il pas utile de le dimensionner pour résister à de telles agressions naturelles.

Le dimensionnement de l'auvent s'effectue de la même manière que celui des pare-soleil décrit dans la fiche correspondante. Le schéma de la fiche ci-jointe illustre le calcul des caractéristiques géométriques d'un auvent, dans le cas d'une façade verticale, en fonction de la hauteur (α) et de l'azimut (γ) du soleil, ainsi que de l'orientation de la façade (β).

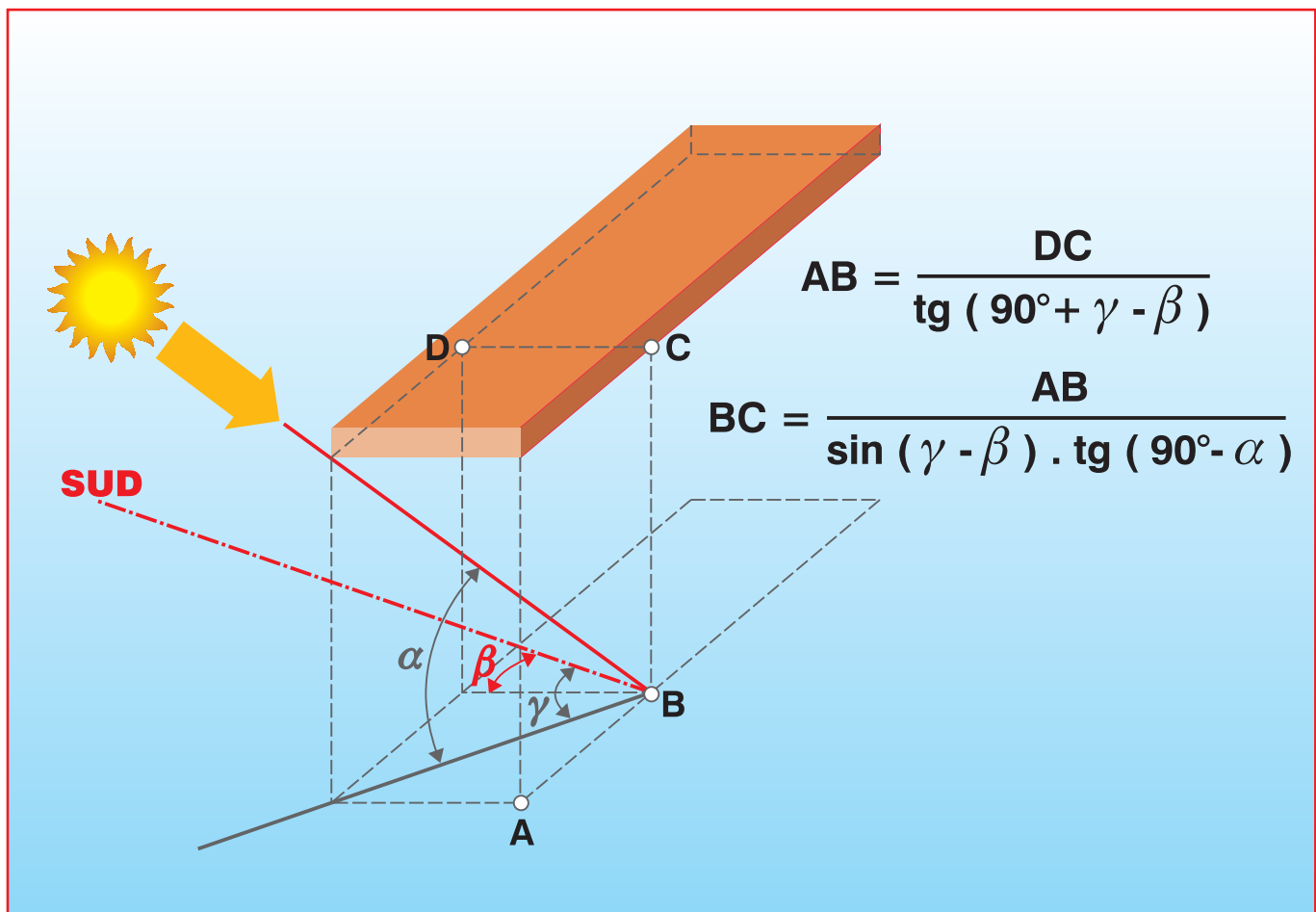
De manière générale, les pare-soleil et les auvents peuvent remplir plusieurs fonctions : protéger les parois et les ouvertures des rayonnements solaires directs, mais également protéger de la pluie, des regards et, éventuellement, du bruit des voisins et des agressions. Les auvents doivent admettre une résistance aux intempéries, comme les tempêtes ou ouragans. Il faut également prendre en considération leur impact sur l'esthétique, sur l'animation de la façade et sur l'apport de lumière au travers des ouvertures.

La protection solaire des ouvertures extérieures ne doit pas tenir compte du rayonnement solaire direct exclusivement, mais aussi des apports liés aux réflexions et du rayonnement solaire diffus. La protection des ouvertures sur l'extérieur d'un habitat est à considérer par rapport au rayonnement solaire global : direct + diffus + réfléchi.

Les auvents protègent les parois verticales, leur détermination géométrique est le résultat d'un double calcul lié à la profondeur et à la surlargeur.



Auvents de Sidi Bou Saïd (Tunisie). 1



2 Calcul des caractéristiques géométriques d'un auvent dans le cas d'une façade verticale.

Deux phénomènes physiques distincts se combinent pour créer les écoulements d'air dans un habitat :

- **les mouvements convectifs** de l'air issus de l'ascension des masses d'air chaudes par rapport aux masses d'air plus fraîches ;
- **les mouvements d'équilibrage** du champ de pression qui enveloppe les parois extérieures du bâtiment (voir fiches 147-148).

Dès qu'il y a du vent sur un site, les mouvements d'équilibrage du champ de pression extérieure deviennent beaucoup plus significatifs que les mouvements convectifs. Cependant, en climat chaud, rares sont les sites qui profitent de vents réguliers en fréquence et en intensité. Or, dès qu'il n'y a plus de vent, seuls les mouvements convectifs peuvent assurer la ventilation intérieure. Les régions qui reçoivent les vents des alizés sont donc les plus privilégiées. Dans tous les autres cas, il vaut mieux établir des systèmes d'évacuation de l'air chaud par des mouvements convectifs.

La circulation intérieure de l'air due à ces écoulements gagne en efficacité en fonction de la disposition des ouvertures :

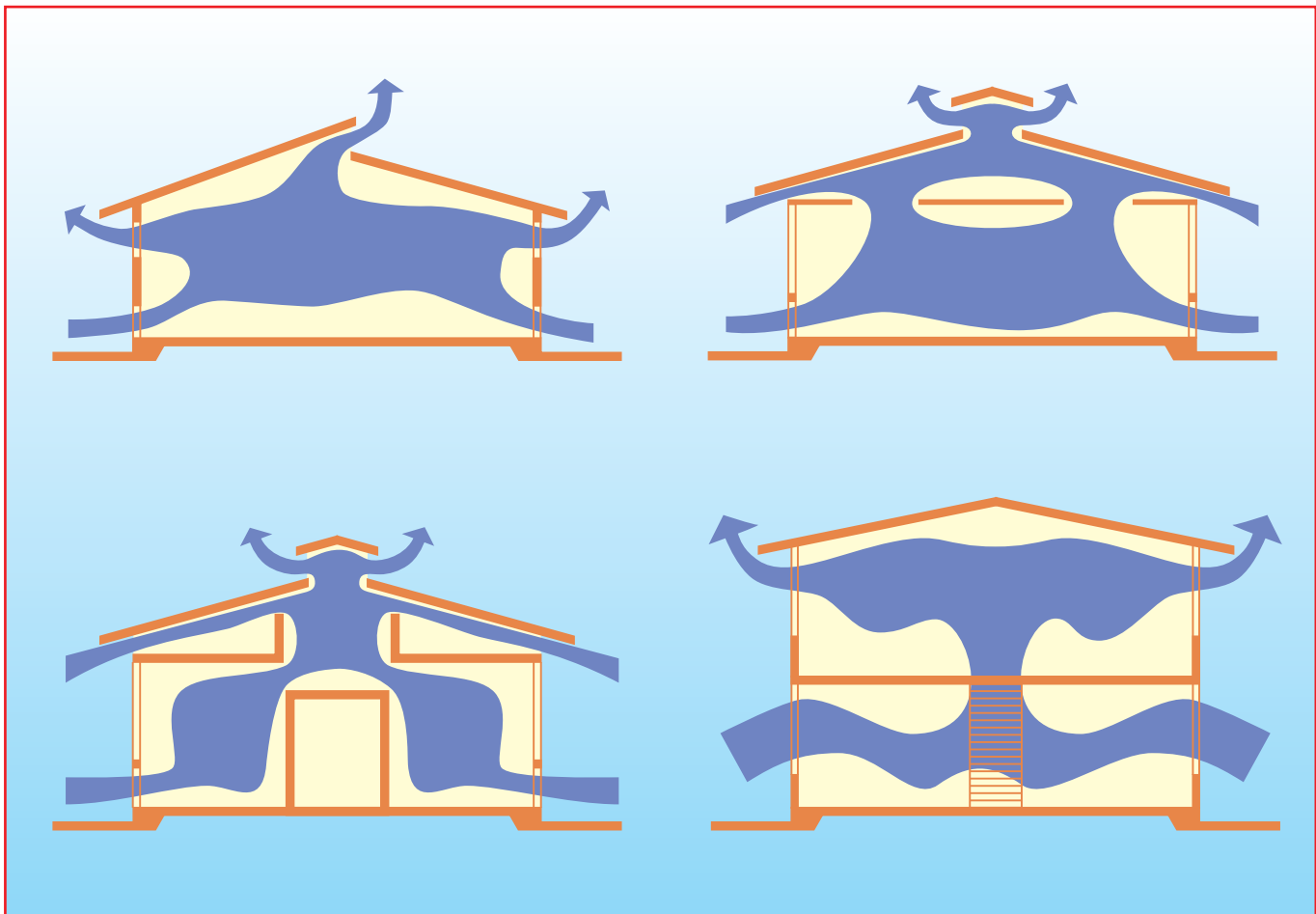
- une seule fenêtre dans une pièce a peu d'effet sur la ventilation. Les ouvertures dans des murs en vis-à-vis offrent de bons résultats, grâce à l'installation d'une percée traversante. L'orientation de ces percements par rapport aux vents dominants est également un enjeu de taille ;
- l'agrandissement de la fenêtre d'évacuation a pour effet d'améliorer la ventilation naturelle, plaçant l'espace intérieur en sous-pression ;
- l'ouverture en toiture ou, du moins, en partie haute de l'habitat, permet à l'air chaud, plus léger que l'air froid, de s'évacuer. L'air chaud étant moins dense que l'air froid, il a tendance à se stratifier dans les parties hautes des pièces. Son évacuation s'effectue par extraction en partie haute, ce qui induit un air neuf en partie basse des pièces. Lorsque cela n'est pas possible, il se forme une poche d'air chaud nuisible au rafraîchissement. Le schéma de la fiche ci-jointe illustre plusieurs principes d'écoulement par "effet de cheminée". De nouveau, les jeux de répartition des pressions autour de l'habitat permettent d'améliorer cet effet de cheminée. Il est important que les arrivées d'air se fassent en partie basse des pièces et que l'évacuation soit possible vers le haut, afin de balayer la plus grande partie possible du volume de l'habitat.

Il faut toutefois rappeler qu'en climat chaud et très sec, une ventilation naturelle à fort débit réchauffe le bâtiment et ses parois et favorise l'entrée des poussières et du sable. Il faut alors limiter les débits d'air par évacuation de l'air vicié.

Les percements permettent de dissiper la chaleur de l'intérieur des locaux vers l'extérieur. Cette dissipation se fait par une ventilation transversale ou verticale.



Ouvertures favorables à une ventilation nocturne par effet de cheminée (Mayotte). **1**



2 Coupe de principe d'écoulement d'air.

Les ouvertures jouent un rôle important dans les relations de l'occupant d'un bâtiment avec son environnement. La fonction caractéristique de la fenêtre dans les climats chauds et humides est de permettre le libre passage de l'air et d'assurer ainsi son renouvellement.

La fenêtre remplit des fonctions complémentaires :

- le contrôle de l'éclairement en quantité, en direction et en qualité. Il s'agit de réguler le niveau de l'éclairement, la distribution de la lumière du jour au fond des pièces et son degré de diffusion ;
- le contrôle de la vue : la fenêtre doit permettre de profiter de la vue ou, éventuellement, de s'en isoler ;
- la protection de l'espace intérieur contre l'intrus, la pluie, la fumée, la poussière, les bruits extérieurs, les moustiques et les voix.

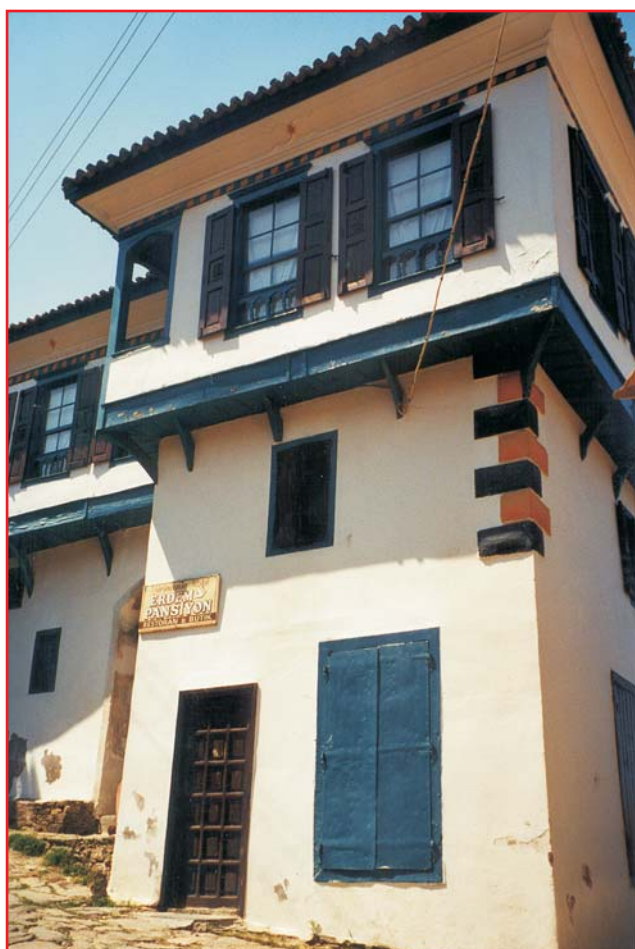
Ainsi, certaines fenêtres peuvent être munies de barres antivol ou de châssis à lamelles orientables en verre. Une toile moustiquaire est à prévoir pour les ouvertures des pièces de nuit. Les équipements d'occultation des ouvertures permettent de réduire, voire d'arrêter la pénétration de lumière extérieure. Les masques architecturaux (l'auvent, le flanc, la loggia, le vis-à-vis, le patio,...) produisent des ombres sur les ouvertures et les protègent contre les apports solaires.

En climats chauds et secs, les équipements de fermetures extérieures, notamment les volets à battants pleins, sont destinés à remplir au moins une des fonctions suivantes : protection solaire et protection contre les vents de sable, intimité et sécurité par rapport aux effractions.

Les ouvertures d'un bâtiment doivent répondre à des fonctions parfois contradictoires. Les performances à atteindre varient au cours de la journée et d'une saison climatique à l'autre.



Cour intérieure d'un palais (Inde). 1



- ✓ laisser pénétrer la lumière
- ✓ capter l'énergie du soleil
- ✓ ventiler les espaces
- ✓ dissiper la chaleur
- ✓ permettre la vue vers l'extérieur et parfois vers l'intérieur
- ✓ caractériser la façade
- ✓ être en contact avec l'environnement extérieur
- ✓ éviter l'éblouissement
- ✓ protéger de l'ensoleillement
- ✓ protéger de la poussière
- ✓ arrêter l'intrusion des insectes
- ✓ isoler du bruit
- ✓ protéger du froid et de la chaleur
- ✓ protéger des intempéries
- ✓ protéger des effractions

2 Les différentes fonctions des ouvertures.

Une bonne ventilation des espaces intérieurs exige une implantation judicieuse du bâti face aux vents dominants. La forme de la toiture et la topographie du terrain peuvent renforcer les différences de pression favorables à la ventilation naturelle. La zone de haute pression borde la façade au vent, la zone de basse pression, la façade sous le vent.

En terrain plat et pour une direction de vent donnée, un bâtiment surélevé, dont la pente de toiture est orientée vers le vent, augmente et homogénéise la dépression de la façade sous le vent. A l'inverse, les toitures en pente dirigée sous le vent, les "toitures-terrasses" et les toits à quatre pentes sont moins efficaces.

Lorsque les vents dominants varient au cours de l'année, d'autres formes de toiture sont à envisager. On préconise alors une toiture à double pente si les secteurs des vents dominants s'opposent plus ou moins selon un même axe. Pour une faible constante directionnelle, on utilisera une toiture à quatre versants.

Dans le cas d'une topographie complexe, l'orientation de la pente par rapport aux vents dominants a beaucoup d'influence. L'emplacement privilégié de l'habitat est alors sur les pentes face au vent et en altitude. Dans ce cas, la pente de toiture orientée sous le vent permet de créer une zone dépressionnaire plus importante en façade sous vent. Le choix d'un emplacement dans un site qui permet la collecte des vents est également pertinent.

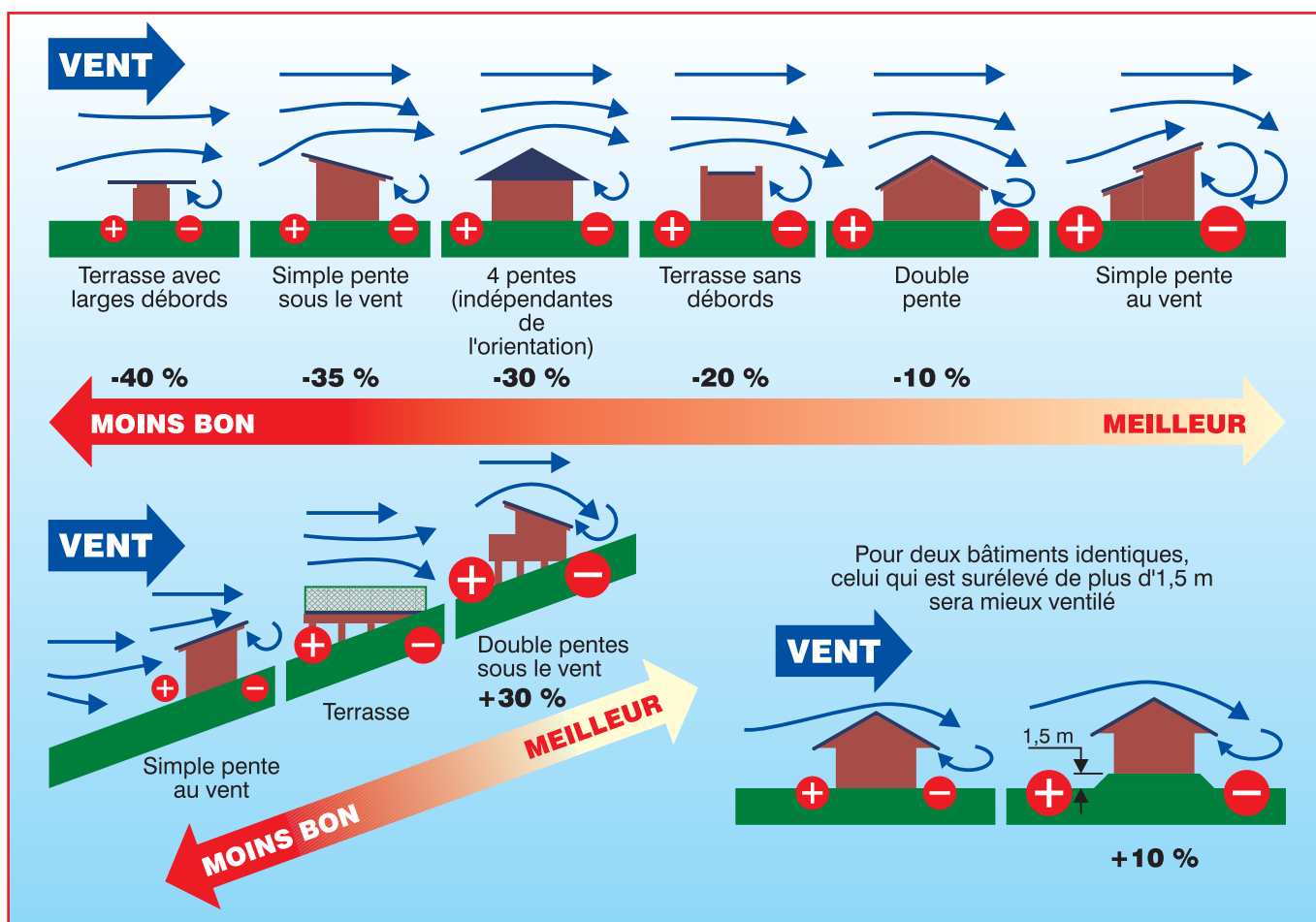
En climat humide, afin de faciliter l'évacuation des eaux, on évite la toiture plate. En revanche, en climat sec, la "toiture-terrasse" offre des espaces complémentaires.

La forme de la toiture influe sur les effets aérodynamiques et donc sur le rapport entre surpressions et dépressions qui se créent autour du bâtiment.



Toiture au vent de l'église Saint Augustin de Kinshasa (Rép.Dém. du Congo) (arch. P. Dequeker).

1



2 Potentiel de ventilation d'un bâtiment en fonction du terrain et de la forme de la toiture (d'après F. Bonneaud).

Les apports thermiques de la toiture peuvent représenter jusqu'aux 2/3 des transferts de chaleur par les parois vers l'intérieur de l'habitat. Pour assurer une importante résistance thermique de la toiture, il existe trois voies complémentaires : la ventilation des combles, les surfaces réfléchissantes et les matériaux isolants. Lorsque la toiture est peu ou pas ventilée, les transferts d'énergie solaire dépendent des caractéristiques de couleur et d'isolation de la toiture.

Les couleurs claires et les surfaces réfléchives en toiture réduisent l'absorption du rayonnement solaire. Les moisissures, les salissures et les autres vieillissements naturels sont à l'origine de l'augmentation dans le temps de son coefficient d'absorption. L'entretien régulier de la toiture est nécessaire.

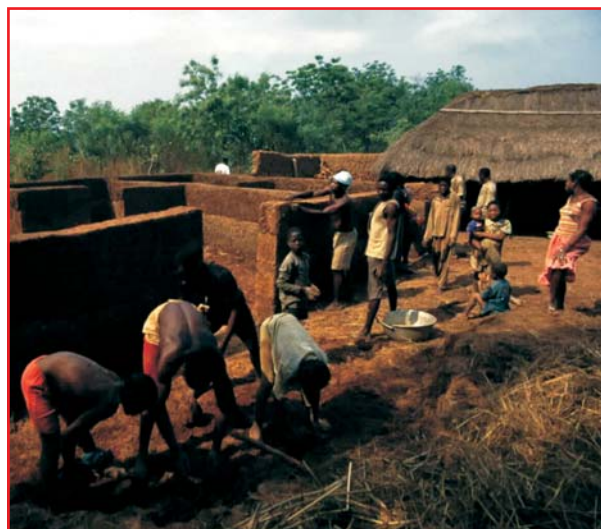
Dans les climats chauds et secs, la toiture doit assurer un certain confort nocturne et diminuer l'impact des apports solaires durant les heures les plus chaudes de la journée.

En zone tropicale humide, la circulation de l'air est nécessaire pour éviter le pourrissement des matériaux de construction. Etant donné les faibles écarts de température entre le jour et la nuit, la toiture doit être légère. Les toitures plates sont à déconseiller, vu le niveau des pluies annuelles. En effet, elles sont très coûteuses et il est quasiment impossible de les maintenir étanches.

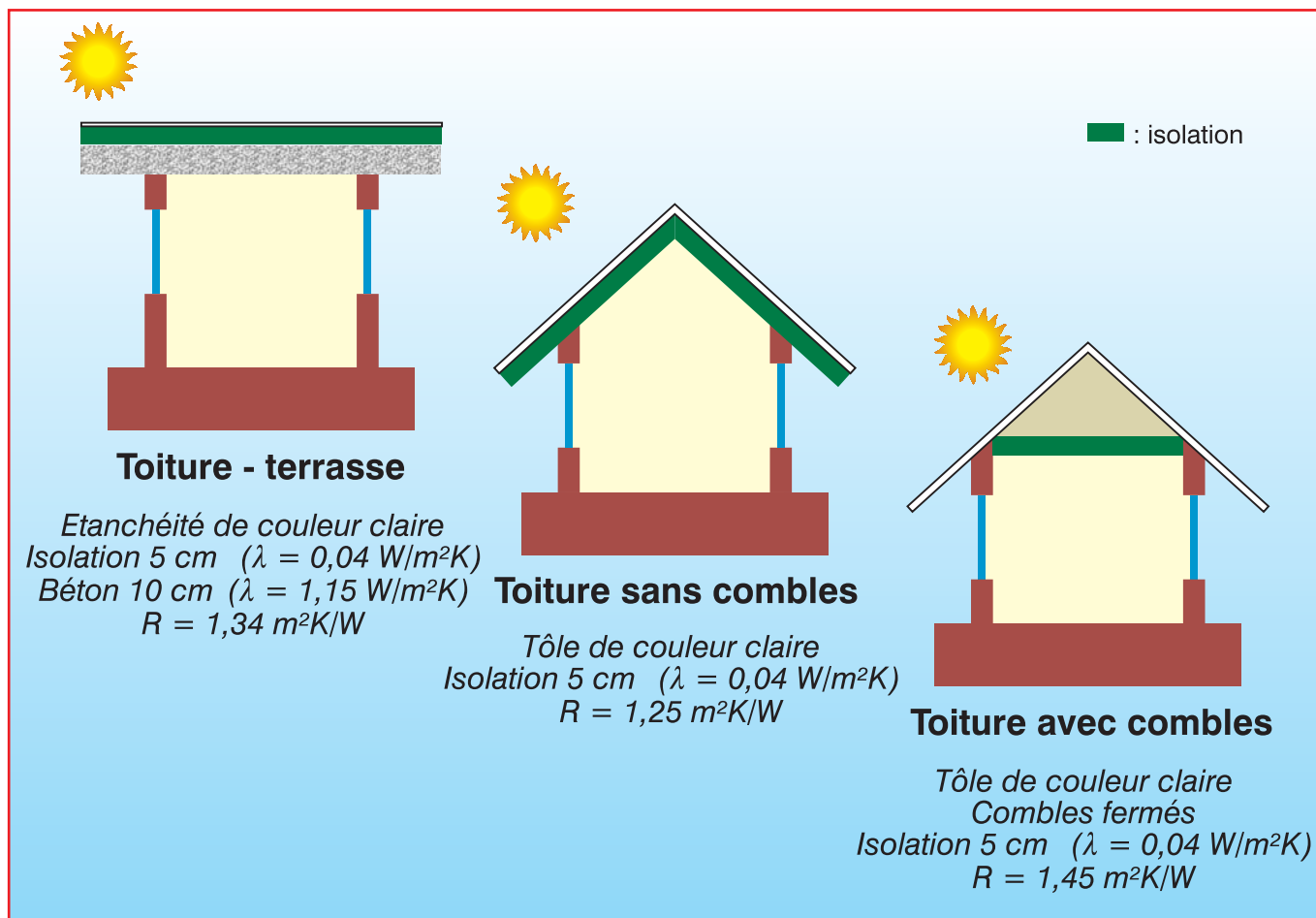
Les "toitures-terrasses", les toitures en pente sans combles et les toitures à combles fermées nécessitent une isolation thermique particulièrement soignée.

La toiture-terrasse, constituée d'une couche d'étanchéité de couleur claire et de 5 cm d'isolation sur une dalle de béton d'une épaisseur de 10 cm, a tendance à emmagasiner la chaleur la journée et à la restituer la nuit. Cette solution est donc à préconiser en climat chaud et sec.

La toiture transmet jusqu'aux 2/3 des transferts de chaleur de l'enveloppe vers l'intérieur du bâtiment. La réflexivité et l'isolation de la toiture limitent ces apports thermiques.



Construction d'une maison (Bénin). 1



2 Typologie des toitures isolées.

La ventilation d'une toiture évacue une grande part des charges thermiques de l'ensoleillement. Elle permet donc d'améliorer le confort de l'habitation. Ce principe de protection solaire adapté aux climats chauds implique que la totalité des ouvertures de combles soit au moins égale à 15 % de la surface totale du toit. Les toitures ventilées sont des solutions à préconiser à chaque fois que le potentiel de vent est suffisant. Elles sont, de plus, des éléments importants en climat humide car elles permettent d'éviter l'altération des matériaux de construction sensibles à l'humidité relative élevée.

Pour une ventilation efficace des combles, une conception spécifique de la toiture est à prévoir. Les écoulements d'air dans les combles ne répondent pas strictement aux champs de pression extérieurs. La simplicité de la volumétrie à l'intérieur des combles favorise la création d'écoulements. La répartition des ouvertures sur le périmètre de la toiture doit être la plus uniforme possible. Les phénomènes de convection thermique influencent beaucoup ces mouvements d'air ; il est donc intéressant de pouvoir évacuer en partie haute les poches d'air chaud qui risquent de se former.

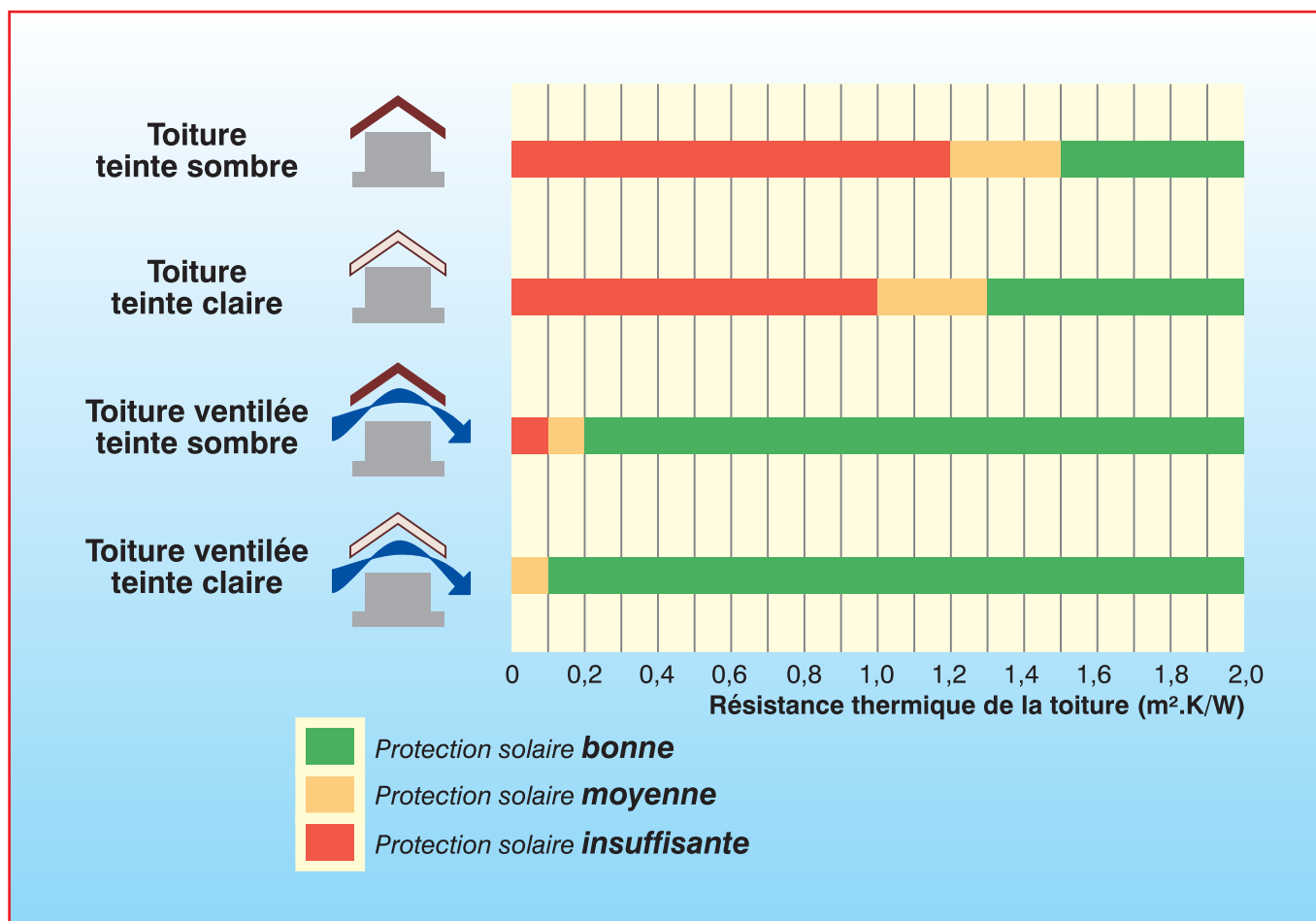
Les transferts d'énergie solaire à travers la toiture ventilée dépendent de l'intensité du balayage aéraulique des combles mais aussi des caractéristiques de couleur et d'isolation de la toiture. Le schéma de la fiche indique que plus la toiture est claire, plus elle est ventilée et moins elle nécessite de résistance thermique. L'augmentation de la résistance thermique de la toiture peut s'accompagner d'une augmentation de son inertie. Elle est généralement désavantageuse en climat chaud et humide où les écarts de température entre jour et nuit sont faibles. Un décalage important des apports risque d'être source d'inconfort nocturne.

La réflectivité et la ventilation de la toiture limitent les apports thermiques vers l'intérieur de l'habitat. En climat humide, le rapport de surface entre ouverture et toiture doit être supérieur à 15 %.



Bureau d'études à Kinshasa (Rép.Dém. du Congo).

1



2 Efficacité de la protection du toit en fonction de la teinte, de la ventilation et de la résistance thermique de la toiture (d'après le CSTB - France).

Les écopés sont des dispositifs de prise d'air de grande dimension intégrés à la toiture. Elles améliorent le potentiel de ventilation naturelle de l'habitat, nécessaire en climat chaud. Essentielles aux volumes intérieurs entièrement traversants, elles s'avèrent idéales pour la ventilation des bâtiments peu poreux. Il existe deux types d'écopés : **les écopés d'extraction** et **les écopés d'admission**.

Les écopés ouvertes vers le vent augmentent l'admission de flux à l'intérieur. Celles ouvertes à l'encontre du sens du vent augmentent l'extraction des flux venant de l'intérieur. Les écopés d'extraction sont généralement plus efficaces que les écopés d'admission car elles placent l'intérieur en légère dépression.

Une mauvaise implantation risque de créer à l'intérieur une zone sous-ventilée, comme le montre le schéma de la fiche. Lorsqu'une écope est placée face au vent, elle doit se trouver le plus près possible de la façade au vent, et inversement. Une faible ouverture en façade au vent risque de favoriser un écoulement de l'air vers la façade sous le vent. Le même phénomène advient dans le cas d'une ouverture importante sur la façade sous le vent et une écope en admission.

Afin de capter des écoulements rapides, frais, moins poussiéreux et moins humides, les écopés sont situées en hauteur. Pour des vents dominants de différentes directions, la conception des écopés est multi-directionnelle. Plus complexes, ces écopés sont généralement moins efficaces que celles à une seule direction.

Le dimensionnement des écopés est un problème à part entière. La surface de section verticale ouverte sur l'extérieur d'une écope est déterminante pour l'efficacité aéroulque du dispositif. Différents éléments entrent en ligne de compte :

- la fréquence et l'intensité des vents dominants ;
- les obstacles aéroulques de proximité ;
- l'intensité et la direction des écoulements dominants le long de la toiture ;
- l'état pressionnaire des espaces intérieurs à ventiler.

D'après les travaux menés dans la soufflerie atmosphérique du CSTB, la section de l'ouverture verticale d'une écope doit représenter environ 20 % de la surface verticale de l'enveloppe du bâtiment perpendiculaire au vent. Les écopés s'avèrent généralement, du point de vue aéroulque, largement aléatoires ou sous-dimensionnées.

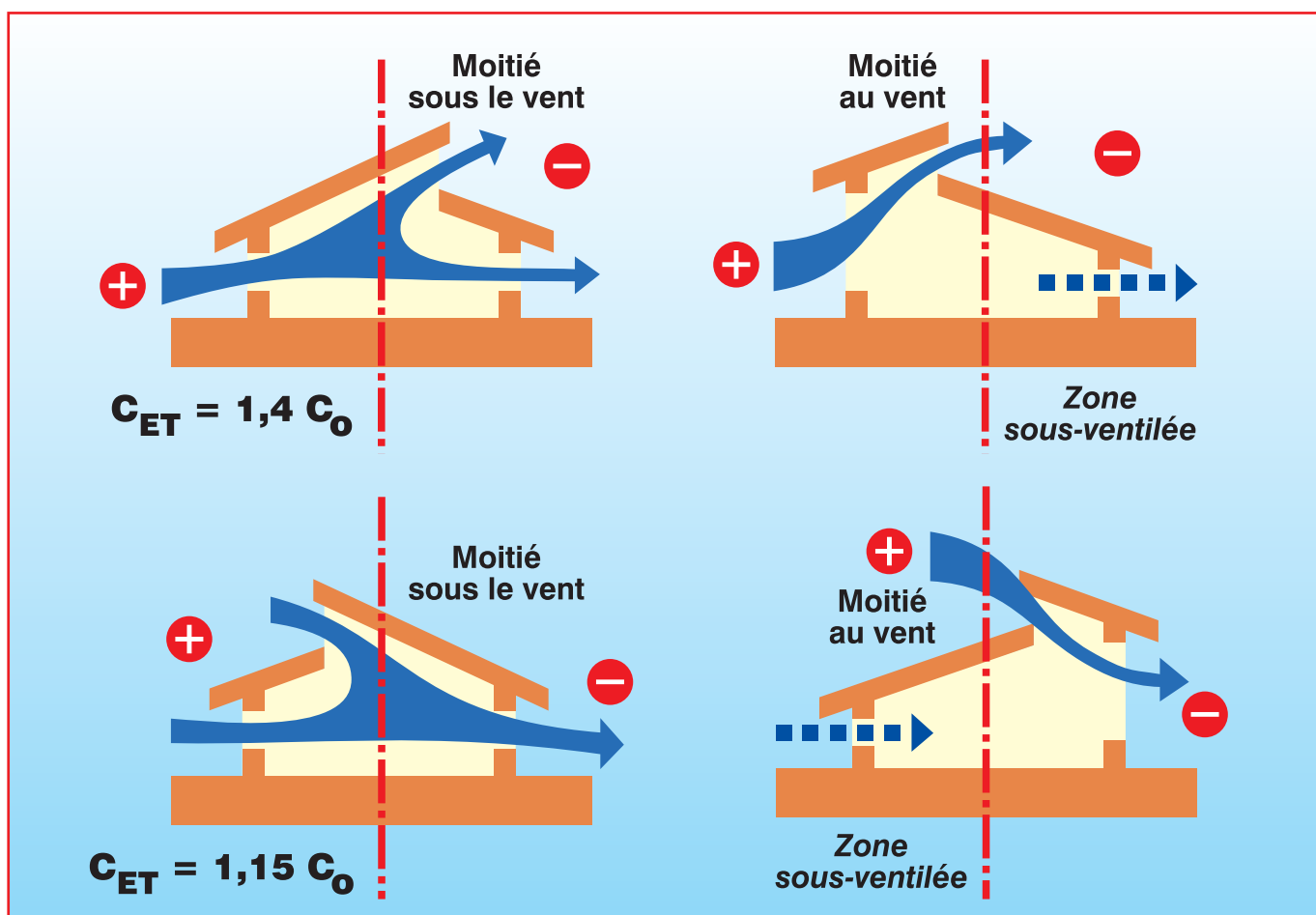
La conception d'une écope exige une grande attention portée à la protection solaire, au traitement de la lumière naturelle, à la protection contre les insectes et les intrusions.

Les écopés sont des dispositifs intégrés à la toiture qui renforcent la ventilation par prise ou extraction d'air. Elles permettent de ventiler les pièces centrales.



Ecopé en toiture d'une maison traditionnelle à Cayenne (Guyane Française).

1



2 Influence de l'implantation de l'écopé en toiture (d'après le CSTB - France).

Les tours à vent sont des dispositifs destinés à capter les vents en hauteur afin de les diriger vers l'intérieur du logement à ventiler. Le capteur fonctionne par la différence de température entre le vent et l'air ambiant intérieur. Le vent, plus frais, moins poussiéreux et moins humide, de par la hauteur à laquelle il est capté, pénètre par le capteur pour descendre au rez-de-chaussée de l'habitation. L'air neuf ainsi introduit chasse l'air intérieur plus chaud et plus vicié. Si, par contre, l'air ambiant est plus frais que le vent en hauteur, une pression empêche la pénétration du vent dans le capteur. Il est préférable de prévoir, pour les saisons froides, des dispositifs qui permettent d'obstruer les bouches.

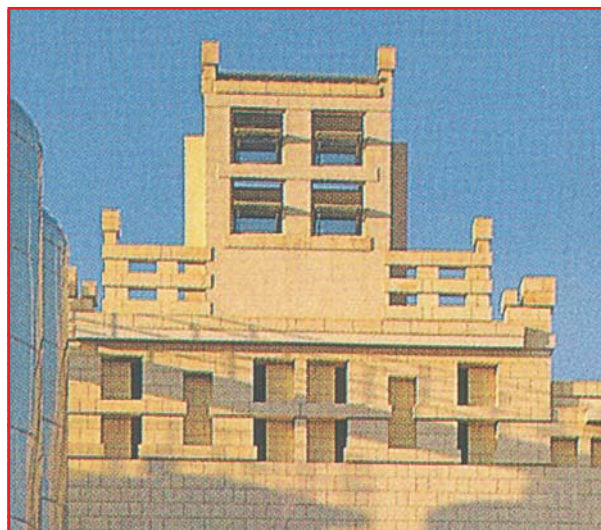
Dans de nombreuses architectures traditionnelles, l'air est conduit par l'intermédiaire de gaines intérieures ou intégrées au mur mitoyen. Les écopés des tours à vent sont généralement en forme d'entonnoir, pour créer un effet venturi, et orientées face aux vents dominants. Lorsque le vent se dirige selon un secteur étroit, l'écope se constitue d'une large section verticale qui va en se rétrécissant légèrement jusqu'à celle du conduit intérieur. Dans les climats à forte amplitude thermique, la forte inertie des matériaux du conduit peut rafraîchir l'air efficacement. Les tours à vent sont utilisées en Irak, en Iran et en Egypte, où on les appelle les "Malqaf".

Le système est amélioré par la suspension de vases d'eau en terre non cuite dans la tour. Cela permet d'humidifier le filet d'air sec et d'abaisser ainsi sa température grâce à l'évaporation de l'eau avant la ventilation dans l'habitat. Les changements d'état de l'eau mettent en jeu des quantités d'énergie importantes. C'est ainsi que, pour évaporer 1Kg d'eau, il faut lui fournir 500 à 600 kcal. Comme cette énergie est prélevée dans l'air du local, il s'y produit inévitablement une diminution de la température. Cette amélioration ne peut être exploitée en climat humide, puisque l'humidité relative est déjà supérieure au niveau de confort. En revanche, en climat sec, elle permet la ventilation des espaces intérieurs : l'air introduit est rafraîchi avant de pénétrer dans l'habitat et les problèmes de poussières liés à la ventilation sont diminués grâce à l'humidité relative de l'air plus élevée.

En ce qui concerne la capture de l'air en hauteur, les considérations à prendre en compte sont les mêmes que pour les écopés. Les pertes dans les conduits aérauliques sont à réduire au maximum. On privilégie donc les sections larges et homogènes des conduits et des bouches ainsi que les conduits rectilignes.

Les tours à vent sont des dispositifs architecturaux traditionnels.

Ils apportent de l'air neuf, rafraîchi, parfois humidifié, et participent à l'évacuation des chaleurs internes du bâtiment.

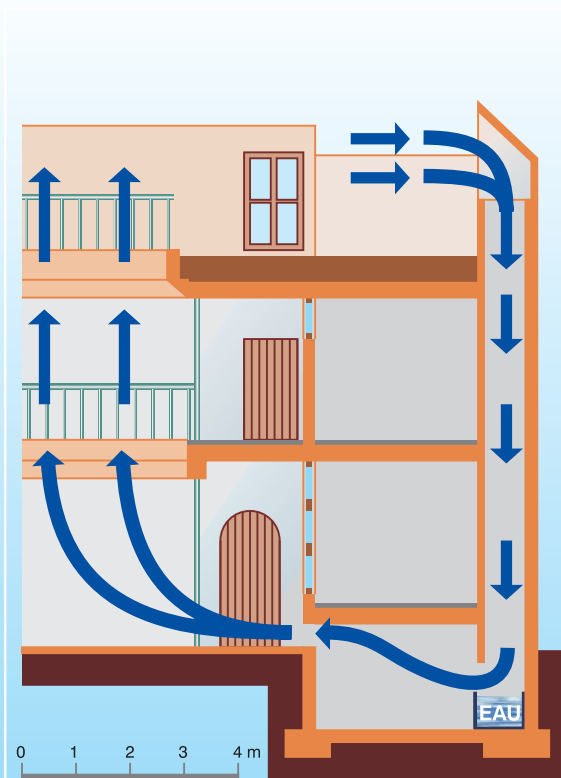


Brasserie Farsons (Malte)
(arch. A. Short et B. Ford).

1



1



2

- 2 1. Tours à vents dans le Sud tunisien.
- 2 2. Principe de fonctionnement d'un tour à vent.

Les pilotis et les joues latérales sous le vent améliorent le potentiel de ventilation naturelle du bâtiment.

Les pilotis autorisent le passage de l'air sous le bâtiment et établissent donc un sillage plus fluide. Ils améliorent le potentiel de ventilation naturelle lorsque la section de passage d'air sous le bâtiment est grande et sans obstacle. Le gain en hauteur du bâtiment et la meilleure fluidité au niveau du sillage augmentent la différence de pression entre les façades au vent et sous le vent. Pour un bâtiment à niveau unique, il faut que la hauteur du passage de l'air libre soit d'au moins un mètre.

Les joues latérales sont des panneaux placés en oblique ou perpendiculairement à la façade. Elles augmentent et stabilisent l'état dépressionnaire de la façade sous le vent. Elles participent ainsi à l'augmentation du potentiel de ventilation de l'habitat. Les parois de volumes annexes à l'habitat qui n'ont pas besoin d'être correctement ventilés peuvent constituer des joues aérodynamiques.

Les joues et les pilotis sont largement utilisés dans les architectures traditionnelles en climat humide. Les pilotis protègent l'habitation des inondations fréquentes dans certaines régions du monde, notamment au Vietnam, en bord de rizières.

Les pilotis isolent l'habitat du sol et en optimisent la ventilation de sillage. Les joues opaques latérales au bâti créent une dépression qui induit une force motrice de ventilation.



Maison familiale sur pilotis dans un village Dao de la province de Ha Giang (Vietnam).



2 Village du Pursat (Cambodge).

Construire “parasismique” suppose tout d’abord le respect de règles de calcul et d’exécution propres aux situations non sismiques. Les règles parasismiques françaises PS 69/82 sont claires à ce sujet. “ (...) L’expérience montre que les ouvrages modernes, lorsqu’ils sont de conception saine et qu’ils obéissent à une application correcte des règles normales de construction, ont des chances non négligeables de supporter convenablement des secousses destructrices d’intensité modérée (...) L’observation des règles parasismiques perd beaucoup de son efficacité si des libertés doivent être prises au niveau des règles normales de construction (...) En particulier, il est vain de prétendre prémunir une construction contre les effets des séismes par la seule vertu des calculs dits antisismiques (...) ”

Le tableau de la fiche correspondante illustre les principaux mécanismes de résistance des constructions aux séismes. Un bâtiment lourd et de grande taille nécessite un plus grand respect des règles parasismiques de construction. De manière générale, plus un bâtiment a une grande inertie, plus les ondes seront bloquées et donc amplifiées. La faible inertie d’un bâtiment permet par contre à l’onde de se propager et d’être absorbée par la structure du bâtiment. La réduction des torsions qui pourraient apparaître lors d’une secousse est à envisager. On privilégie des formes de construction aussi simples et symétriques que possible, aussi bien au niveau du plan que de l’élévation. Il est important que la structure soit régulière et contreventée symétriquement. Une structure hyperstatique présente l’avantage d’absorber une certaine partie du choc par la rupture de liaisons, sans pour autant compromettre la stabilité de l’ouvrage. En revanche, pour les structures à grande portée, lorsque des tassements différentiels sont à envisager, il faut privilégier des structures isostatiques. Pour le choix des matériaux, il faut privilégier ceux qui présentent une résistance mécanique, une rigidité, une résilience, une ductilité, une ténacité, une endurance et une durabilité certaines et un rapport “résistance/masse” élevé.

Le choix du site et du terrain d’implantation est primordial. Il est interdit de construire au voisinage immédiat de failles architectoniques actives. Par ailleurs, il est prudent d’éviter :

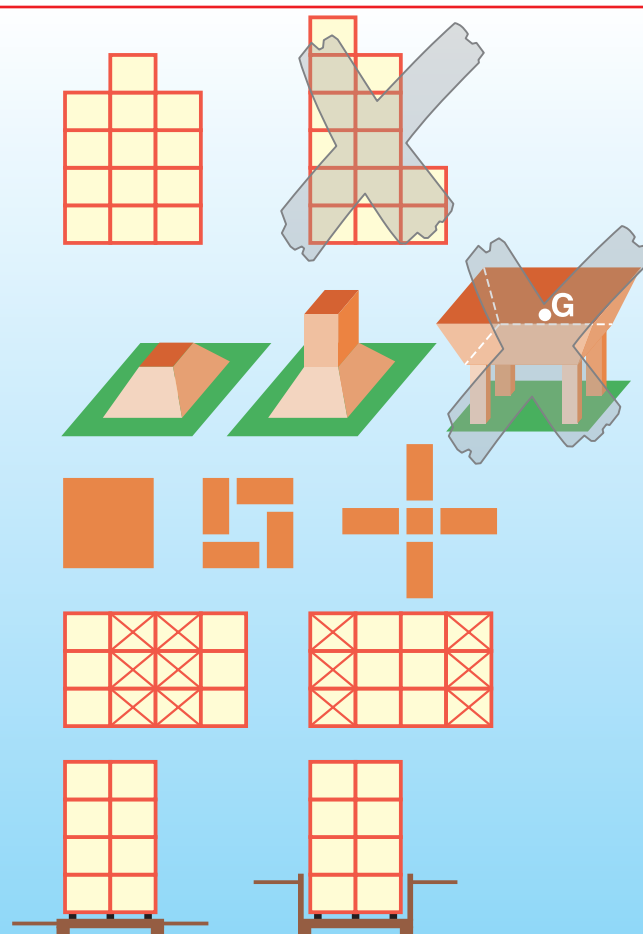
- les terrains gorgés d’eau sensibles au glissement de terrain ;
- les abords des falaises verticales ou en surplomb qui présentent un risque de s’effondrer ;
- les abords des collines sujettes à des décrochements rocheux ;
- les abords des vallées encaissées ;
- les pentes et les abords de pentes sujettes à glissement ;
- les sites sous-minés ou présentant des grandes cavités naturelles ;
- le sommet des collines où les ondes ont tendance à s’amplifier ;
- la proximité d’arbres si le sol est argileux ;
- les sols constitués d’alluvions qui risqueraient, par une topographie encaissée du terrain, de provoquer une amplification des vibrations et de leur durée de vie par l’emprisonnement des ondes.

Les traitements cycloniques et/ou sismiques en zones à risques assurent la pérennité du bâti. Contrairement à la détection des cyclones, la prévision des séismes n'est pas encore fiable.



Yodo River (Japon). 1

- ✓ les constructions légères sont plus avantageuses que les constructions lourdes,
- ✓ opter pour des constructions de faible hauteur,
- ✓ répartir les masses symétriquement par rapport au centre géométrique de chaque niveau,
- ✓ concentrer les masses importantes aux niveaux inférieurs,
- ✓ concevoir des bâtiments de forme simple et à deux axes de symétrie,
- ✓ implanter une structure porteuse régulière et contreventée symétriquement,
- ✓ utiliser des appuis parasismiques,
- ✓ respecter le principe "poteau fort - poutre faible".



2 Principaux mécanismes de résistance des constructions aux séismes.

L'énergie solaire est l'énergie produite par le soleil. Elle est issue de la conversion, à chaque instant, d'hydrogène en hélium. Cette énergie est diffusée dans l'espace et atteint la Terre sous forme de lumière solaire (47 %), de rayons ultraviolets (7 %) et de rayonnement infrarouge ou de chaleur (46 %). La lumière solaire et l'infrarouge sont les parties du spectre qui fournissent l'énergie que nous utilisons :

- le rayonnement solaire peut être capté et converti en énergie utile. Les systèmes les plus simples convertissent l'énergie solaire en chaleur simple (température inférieure au point d'ébullition) pour le chauffage des locaux et de l'eau : ce sont des **systèmes solaires thermiques** appliqués couramment dans l'habitat ;
- une technique plus récente utilise des cellules photovoltaïques (PV) pour produire de l'électricité directement à partir de la lumière solaire : ce sont les **systèmes solaires photovoltaïques**. Ils offrent l'électricité dans les sites non reliés au réseau de distribution ou lorsque des impératifs de sécurité imposent une autonomie totale.

Les systèmes solaires thermiques :

Le système thermosiphon permet à l'eau froide de rentrer dans le capteur par le bas, de subir l'influence du rayonnement et de s'échauffer. L'eau plus chaude monte dans le capteur par convection et atteint ainsi le ballon de stockage. Dans ce ballon de stockage, l'eau chaude est prélevée dans la partie supérieure pour être envoyée vers les différents points de distribution. L'eau froide est introduite à la base du ballon. Une évacuation est aussi prévue à la base pour permettre à l'eau froide de rejoindre le capteur. Ce système fonctionne donc par convection naturelle de l'eau en exploitant le fait que, lorsqu'un liquide s'échauffe, sa masse spécifique diminue et qu'il devient plus léger. Le fluide plus léger aura donc tendance à s'élever et un mouvement se créera dans le circuit entre le capteur et le réservoir placé plus haut. Si le ballon de stockage ne peut pas se trouver au-dessus du capteur, il est alors nécessaire d'utiliser une pompe pour faire circuler l'eau. On parle alors de système solaire thermique à circulation forcée. Afin de commander le fonctionnement de la pompe, un système de régulation est placé entre la sortie du capteur et la sortie du ballon. Ce système de régulation permet d'éviter une diminution de température de l'eau du ballon quand les apports thermiques du capteur sont insuffisants.

Les systèmes solaires photovoltaïques :

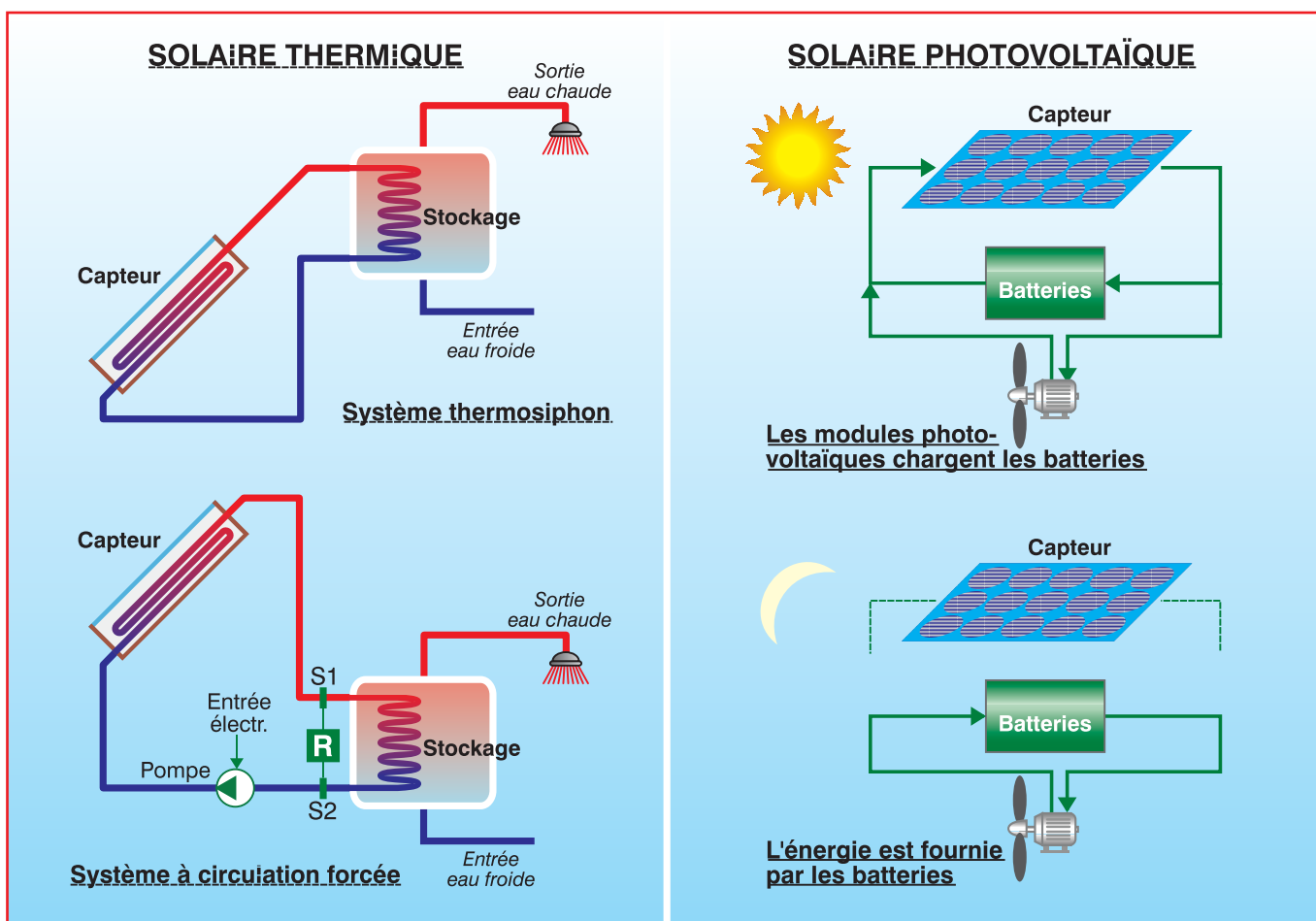
Les cellules photovoltaïques convertissent directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ce sont des couples semi-conducteurs qui deviennent le siège d'une force électromotrice sous l'action de la lumière. Cette force croît avec l'intensité lumineuse. Ces cellules fonctionnent également par ciel couvert, avec le rayonnement diffus. Pendant le jour, les capteurs permettent d'alimenter en courant continu les appareils électriques à faible consommation et le surplus d'électricité fourni est dirigé vers des batteries. Pendant la nuit, le capteur n'étant plus source d'énergie, les batteries prennent le relais pour fournir l'électricité. Afin de protéger les batteries, mais également les appareils électriques, un régulateur de charge est placé dans le circuit. On peut également utiliser un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif.

L'exploitation de l'énergie solaire permet de répondre aux besoins des habitants et d'augmenter leur confort. Les systèmes thermiques chauffent l'eau sanitaire, les systèmes photovoltaïques produisent de l'électricité.



Electrification photovoltaïque en zone rurale (Vietnam).

1



2 Typologies de systèmes solaires thermiques et photovoltaïques.

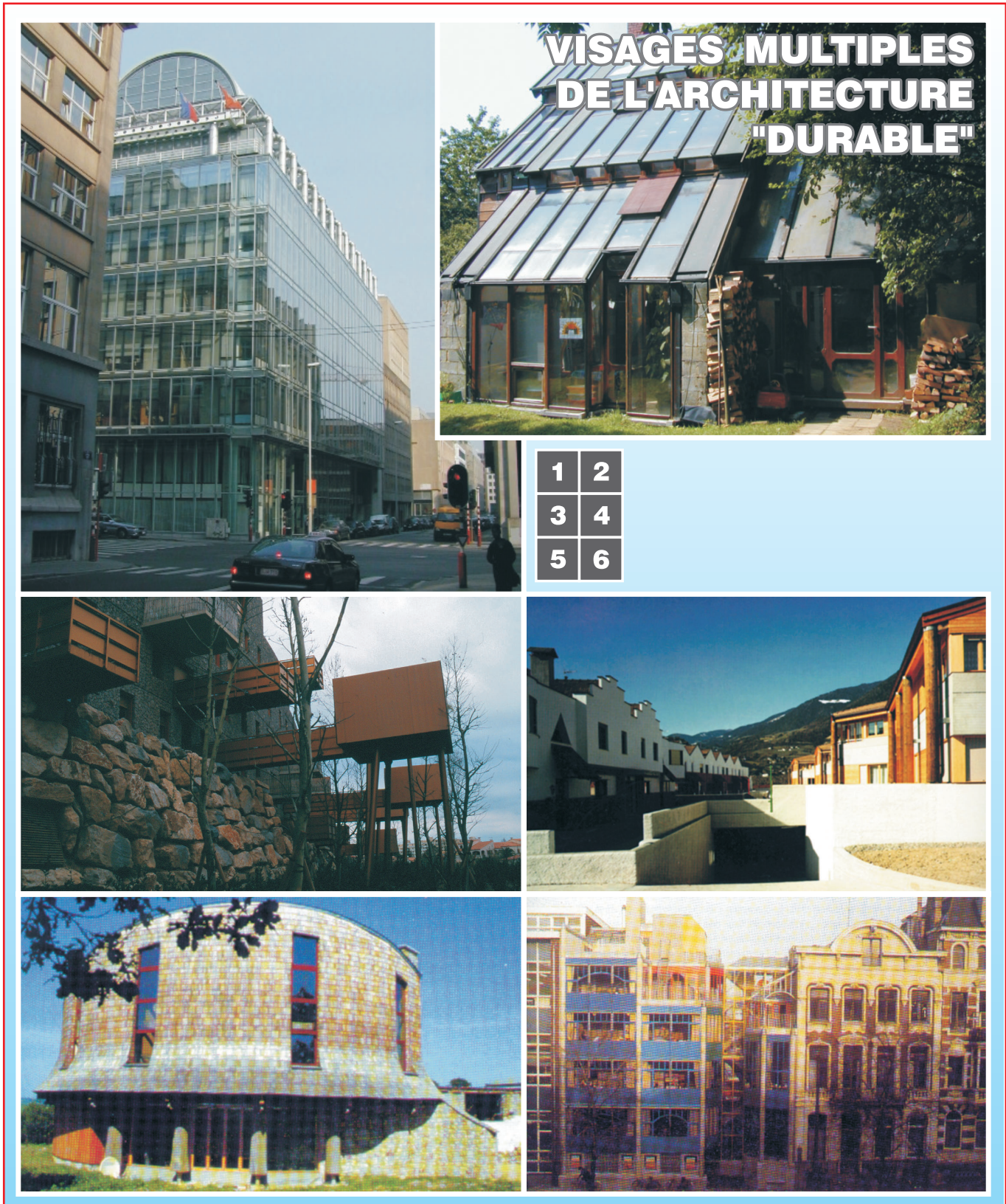
L'architecture écologique a déjà une histoire : on l'a appelée auparavant : architecture solaire, bioclimatique, on l'appellera architecture durable peut-être demain... Une des meilleures synthèses de cette préoccupation architecturale depuis le XIX^e siècle est l'ouvrage de Reyner Banham, *The Architecture of the Well-tempered Environment*, The University of Chicago Press, réimp. 1984. Plus récemment, James Wines a publié *L'architecture verte*, Taschen, 2000.

Aujourd'hui, l'architecture soucieuse de son environnement prend plusieurs visages. Un article récent du JAE¹ propose de reconnaître six logiques principales dans ce qu'on appelle *l'architecture durable* :

1. l'architecture **éco-technique** (ill. 1) prolonge l'espace moderne abstrait par une gestion plus éco-consciente des quantités (énergies, paramètres de confort, etc.). Elle fonctionne comme une *machine* écologique high-tech orientée vers l'avenir et l'efficacité optimale (technologies solaires et photovoltaïques, contrôle de l'air et de la lumière, gestion technique centralisée, traitement des déchets, etc.) ; elle s'inscrit pleinement dans le modèle industriel occidental. Sa vision urbaine correspond à la ville dense et compacte. Sa confiance dans la technique et l'industrie est inébranlable ;
2. l'architecture **éco-centrée** (ill. 2) : le fait écologique reste seul important et la présence humaine (principalement sous la forme de la consommation) y est vue comme un élément perturbant, polluant et négatif. L'homme et la civilisation sont des parasites de la nature : il faut limiter leur "empreinte écologique". Le développement de l'humanité, et particulièrement de la ville, est irrémédiablement malsain. Cette architecture s'évade du social. Les bâtiments doivent être autonomes, disséminés dans la nature et garants de la biodiversité locale. Les matériaux privilégiés sont la terre, le bois, les énergies et matériaux renouvelables, etc. ;
3. l'architecture **éco-esthétique** (ill. 3) cherche à inventer un regard nouveau sur la nature, par une esthétique anti-industrielle ou organique visant à réintégrer une image de la nature dans notre habiter. Elle vise l'invention poétique, le regard neuf sur la matière. L'espace n'est un fait culturel, mais plutôt un fait corporel et individuel, où le contact, la sensualité des matériaux et des lignes est importante. L'architecture est métaphore d'un rapport post-moderne au monde ;
4. l'architecture **éco-culturelle** (ill. 4) se fonde sur l'idée que les cultures spécifiques sont des adaptations historiques des communautés humaines à leurs milieux propres ; chaque tradition culturelle est par définition celle qui a le mieux réussi à s'ajuster aux conditions locales. Cette voie privilégie le respect des traditions et modes constructifs locaux, la notion d'authenticité, d'harmonie, s'inspire du néo-régionalisme, etc. Elle souligne l'appartenance au milieu et la cohésion supposée des groupes culturels ;
5. l'architecture **éco-médicale** (ill. 5) : l'habitat doit avant tout se donner pour objectif un mode de vie sain par des matériaux sains. Son échelle principale est individuelle. Le monde est vu comme pollué et dangereux. Les technologies mises en œuvre sont passives, non toxiques et naturelles. Le bien-être est un mot-clé ;
6. l'architecture **éco-sociale** (ill. 6) met l'accent sur *l'écologie* des relations au sein de la société ; elle privilégie la "performance" des équilibres sociaux par rapport aux questions écologiques propres à l'écosystème. Elle développe des projets d'architecture participative, non-hiérarchique et organique visant à l'appropriation démocratique de l'espace.

Ces familles représentent des tendances qui peuvent se croiser. Elles sont tantôt concourantes (éco-sociale/éco-culturelle ; éco-centrée/éco-médicale), tantôt compétitives (éco-technique/éco-centrée ; éco-esthétique/éco-centrée ; etc.).

1. Journal of Architectural Education 02/2001, Vol. 54, # 3, Association of Collegiate Schools of Architecture, Washington.



Immeuble de bureaux à Bruxelles (Arch. Ph. Samin) - Maison en terre - Louvain-la-Neuve (Arch. P.P. Brichant) - La maison qui pousse à Montpellier (Arch. E. François) - Habitations à Lana de Merano - Italie (Arch. S. Los, N. Pulitzer) - Maison Schäfer à Grufflange - Belgique (Arch. Y. Delhez) - Maison Hubertus à Rotterdam (Arch. A. Van Eyck).

La notion de milieu apparaît au XIX^e siècle avec le développement de la pensée **évolutionniste** :

- Lamarck (1774-1829) désigne les transformations du **milieu** comme cause de l'adaptation des organismes ;
- Darwin (1809-1882) publie en 1859 *De l'origine des espèces*, où il étudie l'adaptation des êtres vivants à leur environnement ;
- Haeckel (1834-1919), partisan de Darwin, invente le terme *écologie*.

Les relations des êtres vivants avec leurs milieux sont **bilatérales** : le sol sur lequel l'arbre pousse n'est pas pour lui un simple substrat minéral. Il est l'œuvre de l'arbre lui-même par son action radiculaire et mécanique, le dépôt répété des feuilles mortes, sa propension à accueillir des organismes parasites, etc. L'ensemble de ces rapports crée une symbiose, c'est-à-dire un équilibre dynamique entre les éléments de l'ensemble. La crise écologique actuelle signifie que les conditions d'équilibre écologique que nous connaissions sont en train de se modifier à notre désavantage (réchauffement global, catastrophes naturelles, montée des mers, etc.) parce que l'effet disrupteur des sociétés industrielles (CO₂) ne peut plus être équilibré par l'inertie des mécanismes écologiques à l'échelle de la planète.

Pour Leroi-Gourhan, notre humanité consiste précisément à **fabriquer notre milieu** (extériorisation du fait social). Par le langage, l'homme *humanise* les choses, se les rend familières, y projette du sens, les inclut dans des rites, les associe à son quotidien : il *mondanise* la Terre, qui devient un monde, c'est-à-dire une construction perspective humaine sur les choses. Humaniser la terre, c'est transformer l'environnement (ensemble objectif de la biosphère) en **écoumène**, c'est-à-dire la Terre en tant qu'elle est *habitée* par les humains.

Par l'outil, l'homme *anthropise* la Terre, il la transforme par la technique : l'agriculture, la construction, les armes, la diététique, etc. Il va façonner les paysages et laisser sa trace en tous les lieux de la planète. Ceci participe aussi à l'humanisation des choses, à la fabrication de l'écoumène puisque la **technique délègue aux choses** des sens proprement humains. C'est ainsi que nous confions à la terre et aux machines, par l'agriculture, le soin de nous nourrir ; à nos maisons, le soin d'être notre écrin et de structurer notre vie collective, à nos fleurs, le soin de nous réjouir, etc... Nous naissons donc à notre humanité en même temps que nous naissons à une relation techno-symbolique à notre milieu, qui s'ajoute à la relation écologique que nous partageons avec le reste de la biosphère.

Les milieux sont donc ces motifs éco-techno-symboliques¹ que nous fabriquons par le simple fait d'exister en tant qu'humains et qui nous fabriquent en retour comme nous sommes :

- ils sont *écologiques* car ils appartiennent à la concrétude de la terre ;
- *techniques*, car ils sont peu ou prou façonnés par l'homme ;
- et *symboliques*, car nous les habitons aussi par le sens et le langage.

Nous les fabriquons parce que, littéralement, nous construisons des routes, des maisons, parce que nous cultivons les champs, etc., mais aussi, symboliquement, parce que nous réinventons continuellement notre environnement : nous faisons de la mer un moyen de transport, du bois un moyen de chauffage, etc.

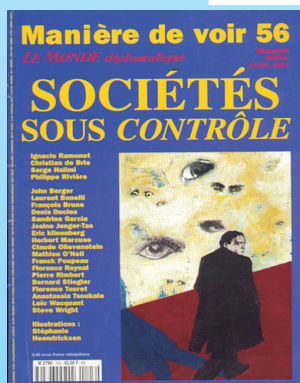
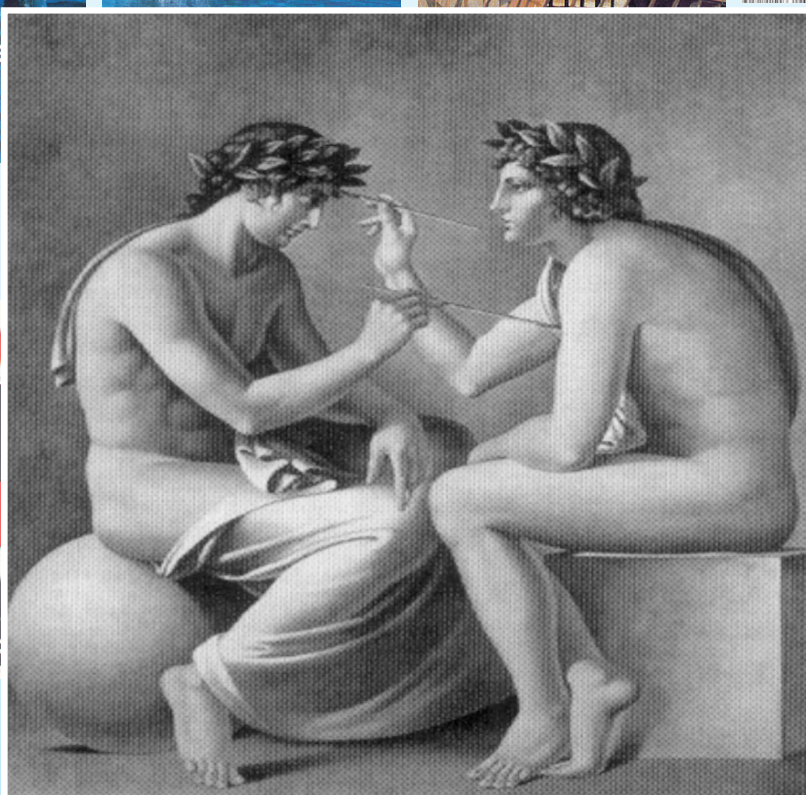
Enfin, ils nous fabriquent en retour : l'hiver nous déprime, la circulation urbaine nous stresse, la pollution générée par nos automobiles nous rend malade, etc. Cette bilatéralité des choses concrètes, faites à la fois d'objectivité (les choses sont ce qu'elles sont) et de subjectivité (elles sont aussi dans notre existence ce que nous pensons qu'elles sont), Berque ou Virilio l'appellent **trajectivité**.

La fabrication de l'architecture est aussi la fabrication d'un milieu puisqu'elle est vécue trajectivement comme sens incarné : concrètement (matériaux choisis), fonctionnellement (abri physique), historiquement (continuité, typologie), culturellement (dépôt-mémoire d'un usage), socialement (urbanisation), artistiquement (styles, genres), psychologiquement (chez moi/chez eux), etc. Comme ils fabriquent leur milieu, les hommes édifient l'architecture et sont *construits* par elle² ou *déconstruits* par elle³.

L'architecture, si elle s'objectifie dans l'acte de sa conception, **retourne au milieu par son usage**, c'est à dire qu'elle s'efface pour laisser les hommes vaquer à leurs occupations. En effet, c'est l'homme qui habite le monde et la Terre. L'architecture est toujours dans son dos : c'est le fond qui nous permet de penser/passé à autre chose. L'architecture est donc un élément fondamental de notre milieu. Même si les architectes objectifient l'architecture comme un objet d'étude, habiter l'architecture déborde ce rapport analytique à l'architecture et lui rend ses qualités de milieu. Pour soutenir son rôle d'élément fondamental de notre milieu, la qualité première de l'architecture est non pas un caractère d'objet plastique isolé, mais, au contraire, **sa capacité à entretenir des relations avec les autres éléments du milieu : institutions humaines, architectures, êtres vivants, terre, air, soleil et eau...**

1. Pour approfondir cette terminologie, voir les ouvrages d'Augustin Berque.
2. Relire Gaston Bachelard, *La poétique de l'espace*, pour les valeurs attachées à la maison...
3. cf. les liens entre délinquance et urbanisme des années soixante.

NOUS CONSTRUISONS NOTRE MILIEU



NOTRE MILIEU NOUS CONSTRUIT

Oeuvre de Carlo Maria Mariani (1983) illustrant la relation symétrique des milieux, sur fond de couvertures de magazines d'actualité permettant d'ouvrir la notion de milieu à l'ensemble de nos relations au monde et à la terre.

Dès 1990, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat annonçait des changements climatiques majeurs pour le XXI^e siècle et démontrait le lien de causalité entre les activités humaines et le réchauffement du climat global de notre planète depuis l'ère industrielle (figure 2). Dans son troisième rapport d'évaluation remis cette année, le GIEC confirme à nouveau la gravité de ce diagnostic et prévoit pour 2100 une augmentation de la température de l'air en surface de 1,5°C à 6°C en moyenne globale. Cette hausse des températures serait la plus ample de toutes celles survenues au cours des 10 000 dernières années. Elle n'est donc pas négligeable et ne peut être imputée uniquement à des phénomènes naturels cycliques.

Compte tenu de la complexité des paramètres climatiques et humains, les conséquences exactes de cette augmentation ne peuvent pas encore être déterminées avec précision par la communauté scientifique. Il n'apparaît toutefois pas improbable que les zones climatiques pourraient se déplacer vers les pôles de 150 à 500 km dans les régions de latitude moyenne modifiant ainsi profondément les écosystèmes et donc le tissu socio-économique local.

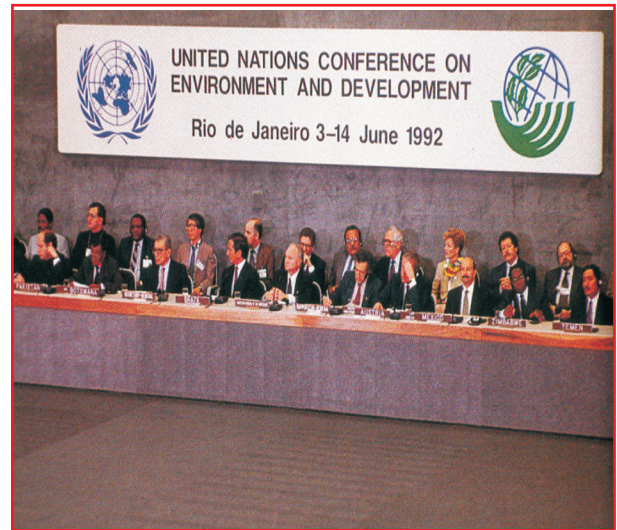
Pour faire face à ces nouveaux enjeux planétaires (changements climatiques, épuisement des ressources, atteinte à la faune et à la flore...), l'Organisation des Nations Unies a mobilisé en 1992 plus de 170 chefs d'État lors de la Conférence Internationale sur l'Environnement et le Développement qui s'est tenue à Rio de Janeiro (figure 1). L' "Agenda 21" proposé au terme de ce premier Sommet de la Terre reprend les lignes directrices définies en 1987 dans le rapport Brundtland intitulé "Our Common Future" et fixe les objectifs à suivre pour tendre vers un "développement durable" au XXI^e siècle. Le paradigme de développement durable tel qu'adopté par l'assemblée générale des Nations Unies y est défini comme suit :

"Le développement durable est le développement qui permet de satisfaire les besoins actuels sans pour autant compromettre les possibilités des générations futures de satisfaire leurs propres besoins".

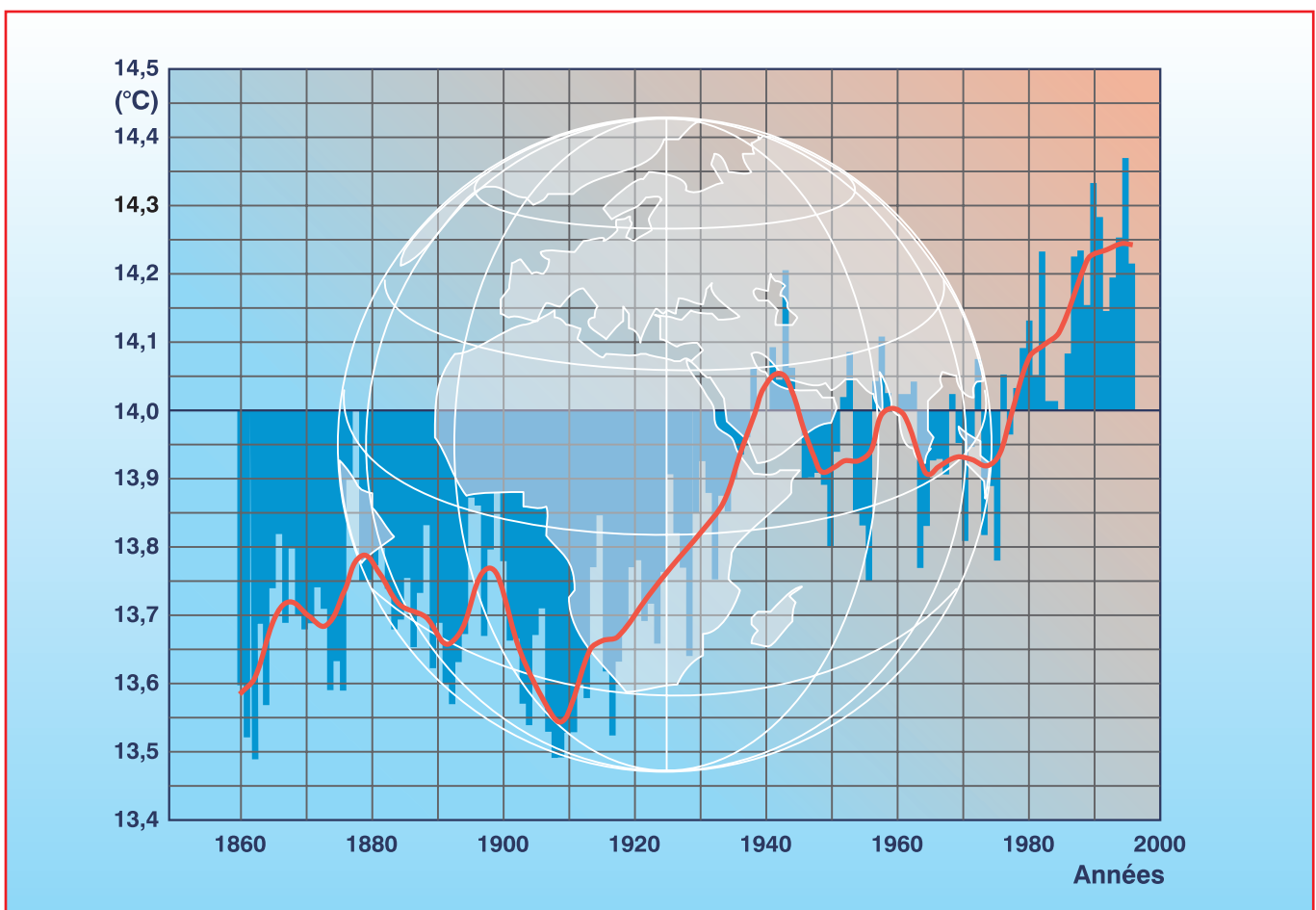
Néanmoins, il a fallu attendre la conférence de Kyoto en décembre 1997 pour que les intentions souscrites à Rio soient traduites en objectifs chiffrés en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'Europe s'est ainsi engagée à réduire ses émissions entre 2008 et 2012 de l'ordre de 8 % par rapport au niveau de 1990. 10 ans après Rio, c'est finalement lors des conférences de Bonn et de Marrakech en 2001 qu'un accord sur les modalités d'application du protocole de Kyoto a été trouvé entre les différents pays membres de la Convention sur les Changements Climatiques.

Malgré l'urgence, s'il ne reste maintenant plus qu'aux pays signataires à ratifier ce protocole pour 2002, de nombreux obstacles restent encore à lever. Ainsi, Georges W. Bush remettant en cause depuis son élection comme président des États-Unis d'Amérique la validité des conclusions scientifiques du GIEC, seuls les États-Unis n'ont pas souhaité conclure cet accord, mettant ainsi, un peu plus, en péril l'équilibre de notre environnement planétaire.

Les changements climatiques planétaires ont porté la protection de l'environnement au premier plan des préoccupations actuelles et constituent, dans une perspective de développement durable, le défi majeur de ce XXI^e siècle.



1 Tribune du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 (La Documentation Française).



2 Évolution de la température moyenne à la surface de la Terre (Hadley Center).

Pour préserver notre environnement, le secteur du bâtiment doit jouer un rôle primordial, car il est responsable en Europe d'une large part des impacts environnementaux :

- 50 % du total des ressources naturelles exploitées ;
- 45 % de la consommation totale d'énergie ;
- 40 % des déchets produits (hors déchets ménagers) ;
- 30 % des émissions des gaz à effet de serre ;
- 16 % de la consommation d'eau dont 1 à 2 % pour l'alimentation humaine.

Conscients de l'importance du défi à relever, les concepteurs, les entrepreneurs et les industriels se mobilisent de plus en plus pour maîtriser et réduire autant que possible ces impacts environnementaux en cherchant à prendre en considération l'ensemble des différentes phases du cycle de vie (figure 2) des produits de construction et plus largement du bâtiment :

- fabrication des produits de construction ;
- construction ;
- exploitation et maintenance ;
- réhabilitation ou adaptation ;
- déconstruction (figure 1).

À chacune de ces phases, dès la fabrication des produits de construction, les travaux entrepris constitueront une charge importante pour notre environnement en terme de :

- consommation énergétique pour l'extraction des matières premières, le transport et la production des produits de construction ;
- production de déchets de construction et de démolition (inertes, bois, métaux, pots de peintures...) ;
- pollutions de l'air, de l'eau et du sol (gaz d'échappement, huiles usagées, eaux usées non traitées...) ;
- destruction de la flore ou de la faune existante ;
- nuisances diverses sur l'environnement proche (bruits, poussières...).

Cependant, c'est au cours de sa vie que le bâtiment sera réellement le plus pénalisant pour l'environnement. La phase d'exploitation-maintenance contribue pour une large part aux impacts environnementaux d'un bâtiment : consommation de fuel, de gaz ou d'électricité pour le chauffage, le rafraîchissement, ou l'éclairage, d'eau potable pour l'alimentation ou les sanitaires, production de déchets ménagers, rejets d'eaux usées, émission de gaz à effet de serre émis par les systèmes de chauffage (NO_x , CO_2 , SO_2 , poussières)...

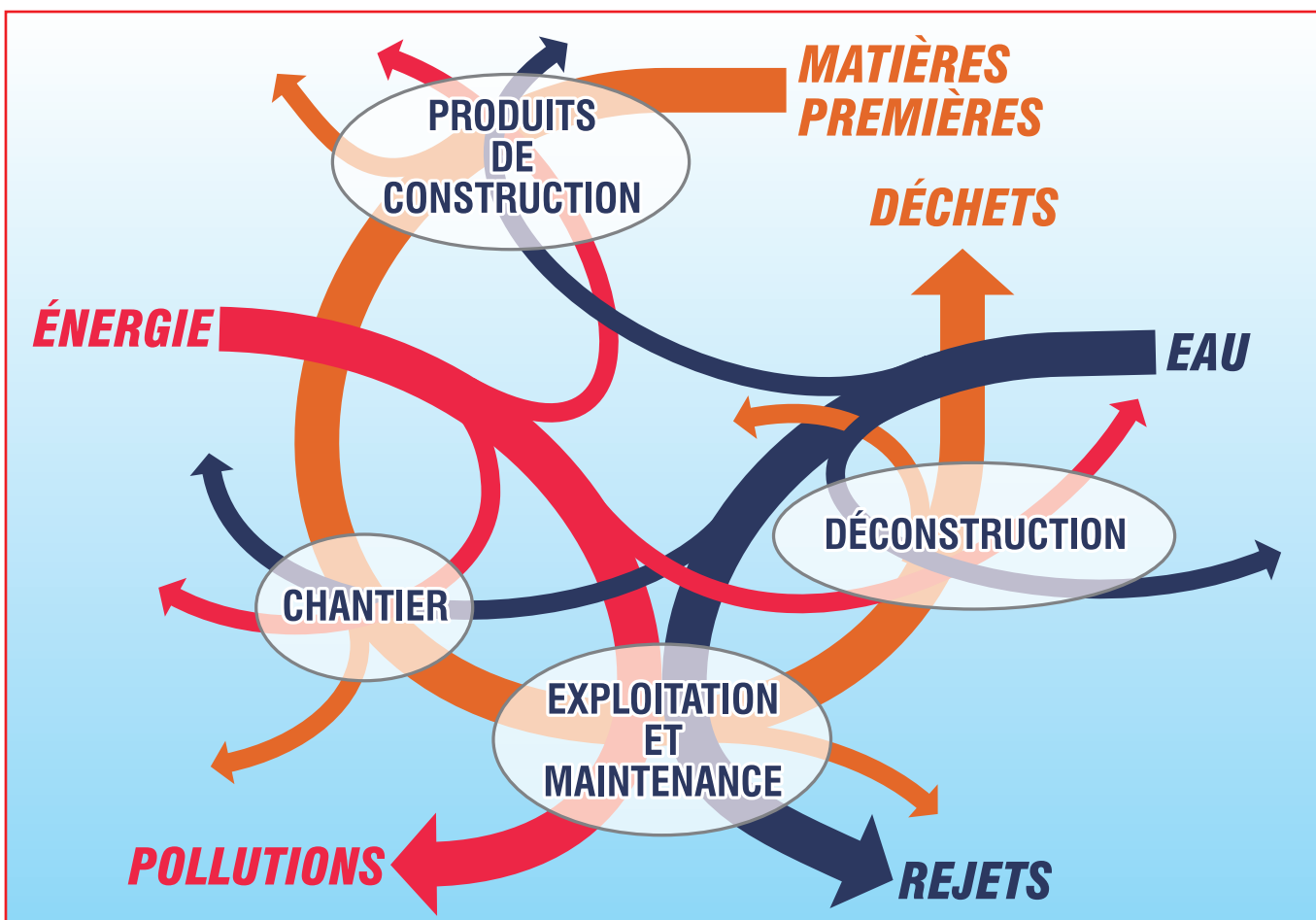
En fin de vie, le bâtiment devra être finalement démoli, voire déconstruit de manière à récupérer sélectivement ce qui sera devenu un ensemble de déchets. Le bâtiment disparu, il conviendra de procéder à une remise en état du site (récupération des fondations, dépollution du sol, replantations...). La démarche HQE a largement contribué à attirer l'attention du secteur du bâtiment sur ce point en privilégiant l'adaptation des bâtiments ou en proposant d'organiser la déconstruction sélective des bâtiments lors de certaines opérations.

Si cette présentation du cycle de vie apparaît extrêmement négative par ses nombreux impacts directs et indirects sur l'environnement naturel, nous ne devons pas oublier que le bâtiment n'est pas un objet inerte. Tout au contraire, le bâtiment rentre en symbiose avec ses occupants et avec son environnement proche, apportant ainsi une plus-value, souvent non-quantifiable, pour l'homme et la nature.

Le cycle de vie d'un bâtiment comprend plusieurs phases qui vont de l'extraction des éléments primaires et la fabrication des composants de construction, jusqu'à sa déconstruction sélective en fin de vie et à la remise en état du site.



1 Déconstruction sélective d'un bâtiment (Mulhouse) (IFARE - Institut Franco-Allemand de Recherche sur l'environnement).



2 Le cycle de vie d'un bâtiment (d'après E. Dufrasnes).

Le bilan carbone du bâtiment en phase de construction est une méthode d'évaluation de la quantité de dioxyde de carbone stocké ou émis dans l'atmosphère pour l'édification de ce bâtiment. Pour une maison d'habitation traditionnelle, il correspond, en moyenne, à 10 ans d'émissions en phase d'exploitation.

Ses performances s'expriment soit en tonnes de CO₂ émises ou évitées, soit, plus généralement, en Kg de carbone par m² habitable. Les valeurs négatives correspondent à un stockage de carbone et les valeurs positives correspondent à une émission de carbone.

Le bilan carbone du bâtiment en phase de construction dépend de trois facteurs :

- du type de matériaux utilisés ;
- de leur provenance et de leur mode d'acheminement ;
- des procédés mis en œuvre pour l'édification du bâtiment.

Les matériaux :

Le CO₂ présent dans l'atmosphère est un des éléments nutritifs essentiels du règne végétal. Dans les arbres, il est fixé au niveau des feuilles et se transforme par photosynthèse en carbone et en oxygène (libérée). Il faut 1,85 Kg de CO₂ pour produire 1 Kg de bois brut, mais plusieurs kilos de bois brut sont nécessaires à la production d'un kilo de bois de construction. En moyenne, le matériau bois permet donc de stocker 3,49 Kg de carbone par Kg de bois de construction employé, mais cette valeur varie selon l'état sous lequel il se trouve : planche, aggloméré, lamellé collé, fibre...

À l'image du bois, tous les matériaux de construction d'origine végétal (laine de chanvre, ouate de lin, papier, carton...) sont capables de stocker du carbone.

L'utilisation des autres matériaux de construction, tels que le béton, le plâtre, les plastiques... génèrent, pour leur part, des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Prenons par exemple le cas du PVC : l'utilisation d'1 Kg de ce matériau dans un bâtiment entraîne une émission de 2,22 Kg de CO₂.

Ceci s'explique par les processus de fabrication utilisés pour ces matériaux. Certains, comme les métaux par exemple, requièrent une quantité d'énergie considérable pour leur façonnage (ou modelage). Et plus la quantité d'énergie utilisée est importante, plus les émissions de CO₂ sont conséquentes.

On établit ainsi un tableau des émissions de CO₂ par matériau utilisé.

Le transport :

Le bilan carbone du bâtiment dépend également de la quantité d'énergie nécessaire au transport des matériaux entre leur lieu de production et le lieu de construction du bâtiment. Plus la source de production du matériau est éloignée de sa destination finale et plus la quantité d'énergie utilisée pour son transport est importante donc émettrice de CO₂.

Le bois, par exemple, qui stocke le carbone, peut voir son bilan fortement diminué, voire s'inverser, dès lors que la forêt d'origine se situe à des centaines de kilomètres du lieu d'exploitation.

Le moyen de transport utilisé pour l'acheminement du matériau est aussi un des facteurs à prendre en compte. D'une façon générale, le transport par le rail est à privilégier au transport par la route, quant au transport en avion, très énergivore, il est à déconseiller.

Dans une optique de développement durable, les acteurs de la construction veilleront donc à :

- favoriser l'approvisionnement en essences et matériaux locaux ;
- grouper les commandes de matériaux chez un même fournisseur ;
- minimiser les distances d'acheminement ;
- définir un mode de transport adapté.

L'édification du bâtiment :

Les procédés utilisés pour l'édification d'un bâtiment constituent le troisième point à considérer dans le bilan carbone du bâtiment.

La multiplication des appareillages d'édification sur un chantier, tels que les grues, génère des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre doivent donc privilégier l'emploi de matériaux pré-assemblés sur le lieu de production, limitant ainsi le nombre de transport et le nombre d'appareillages nécessaires sur le chantier.

Une bonne gestion de la consommation énergétique sur le chantier permet ainsi d'améliorer le bilan carbone du bâtiment.

Dans le cadre des engagements internationaux pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, l'approche spécifique que représente la notion de bilan carbone en phase de construction pourrait sans doute s'intégrer dans un cadre réglementaire. L'attribution, par exemple, d'une subvention sur la tonne de carbone stockée et la mise en place d'une taxe sur la tonne de carbone émise (notion de pollueur-payeur), contribueraient sans aucun doute à accroître l'utilisation de matériaux stockant du carbone.

Le bilan carbone du bâtiment en phase de construction est une démarche spécifique liée au choix des matériaux, de leur transport et des techniques de construction.



Maison à ossature bois à Puy Saint André (France) (Architecte : E. Boissel). **1**

Maison traditionnelle					Maison privilégiant les matériaux d'origine végétale				
Matériaux	Kg CO ₂ /Kg ou m ² *	Densité*	Volume ou surface	CO ₂ éq	Matériaux	Kg CO ₂ /Kg ou m ² *	Densité*	Volume ou surface	CO ₂ éq
Bois	-3,49	680	10	-23 732	Bois	-3,49	680	120	-284 784
Béton	0,13	2 355	150	45 923	Béton	0,13	2 355	40	12 246
Tuiles fibrociment	0,88	1 600	4	5 632	Tuiles	0,35	1 900	4	2 660
Laine minérale	0,98	25	60	1 470	Ouate de lin	0	125	60	0
Carrelage	0,0038	1 980	150	1 083	Revêtement collé (m ²)	0,26	-	150	39
Fenêtres ouvrants aluminium (m ²)	29,1	-	25	728	Fenêtres ouvrants bois (m ²)	-15,57	-	25	-389
Total				31 104 Kg	Total				-270 228 Kg
Soit une <i>émission</i> de 207 KgCO₂/m² habitable					Soit un <i>stockage</i> de 1 802 KgCO₂/m² habitable				

* Source : ETH de Zurich et École des Mines de Paris

2 Comparaison des bilans carbone entre une maison traditionnelle et une maison privilégiant les matériaux d'origine végétale pour une surface habitable de 150 m² et un volume de 375 m³.

Parmi les énergies renouvelables, l'architecture bioclimatique utilise principalement le solaire. L'exploitation de cette énergie se caractérise par un investissement parfois lourd, mais un "combustible" gratuit. Une étude économique doit en optimiser le dimensionnement. Les durées d'amortissement des installations solaires peuvent varier en Europe de 5 ans à plus de 20 ans selon les applications et les modes de financements.

Leur utilisation nécessite généralement un surcroît de travail humain (études, entretien, etc.) ce qui crée de l'emploi direct à considérer dans une logique de développement durable.

Le solaire passif :

Utiliser l'énergie solaire passive permet des gains d'énergie importants en assurant une part du chauffage. Dans les mêmes proportions, la conception bioclimatique tente d'éviter le recours aux systèmes de rafraîchissement mécaniques.

Dans nos climats tempérés européens, utiliser l'énergie solaire passive dans le logement c'est :

- privilégier les orientations du Sud à l'Est pour récupérer les apports solaires ;
- éviter les surfaces vitrées Sud-Ouest et Ouest pour réduire les risques de surchauffe ;
- se protéger des vents dominants d'hiver ;
- utiliser les brises rafraîchissantes d'été.

Les apports solaires peuvent entraîner des surchauffes en été et en mi-saison. Il est donc nécessaire d'optimiser le dimensionnement des baies vitrées pour satisfaire simultanément aux besoins en éclairage naturel.

L'énergie solaire thermique :

Le solaire thermique s'emploie pour chauffer l'eau sanitaire et/ou pour le chauffage. L'énergie solaire est véhiculée au moyen d'un fluide circulant dans un système de tuyaux (protégés contre le gel dans les parties extérieures) et par le biais d'un échangeur.

Le chauffe-eau solaire permet de fournir une part de l'eau chaude sanitaire, qui couvre en moyenne de 30 % à 90 % des besoins selon l'usage et le climat. Les capteurs vitrés plans fonctionnent soit en thermosiphon soit avec un circulateur.

Dans le cas d'un chauffage par plancher solaire direct, le fluide caloporteur circule dans un réseau de tubes intégrés dans une dalle de béton formant un plancher bas ou d'étage. L'appoint est fourni soit par l'intermédiaire du plancher chauffant, soit par un appoint indépendant (bois, gaz, fioul, l'électricité...)

Ce mode de chauffage est particulièrement adapté aux régions dont le climat se caractérise par des besoins de chauffage importants en hiver associés à un bon ensoleillement.

L'électricité photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques ont la faculté de convertir la lumière solaire en électricité. L'énergie lumineuse provoque un déplacement des électrons dans la photopile, créant un courant électrique.

La puissance fournie s'exprime en Watt-crête (Wc) qui représente la puissance maximale fournie par le module. La productivité moyenne des cellules photovoltaïques est de 70 à 130 kWh/m².an selon la latitude.

Deux types d'application existent :

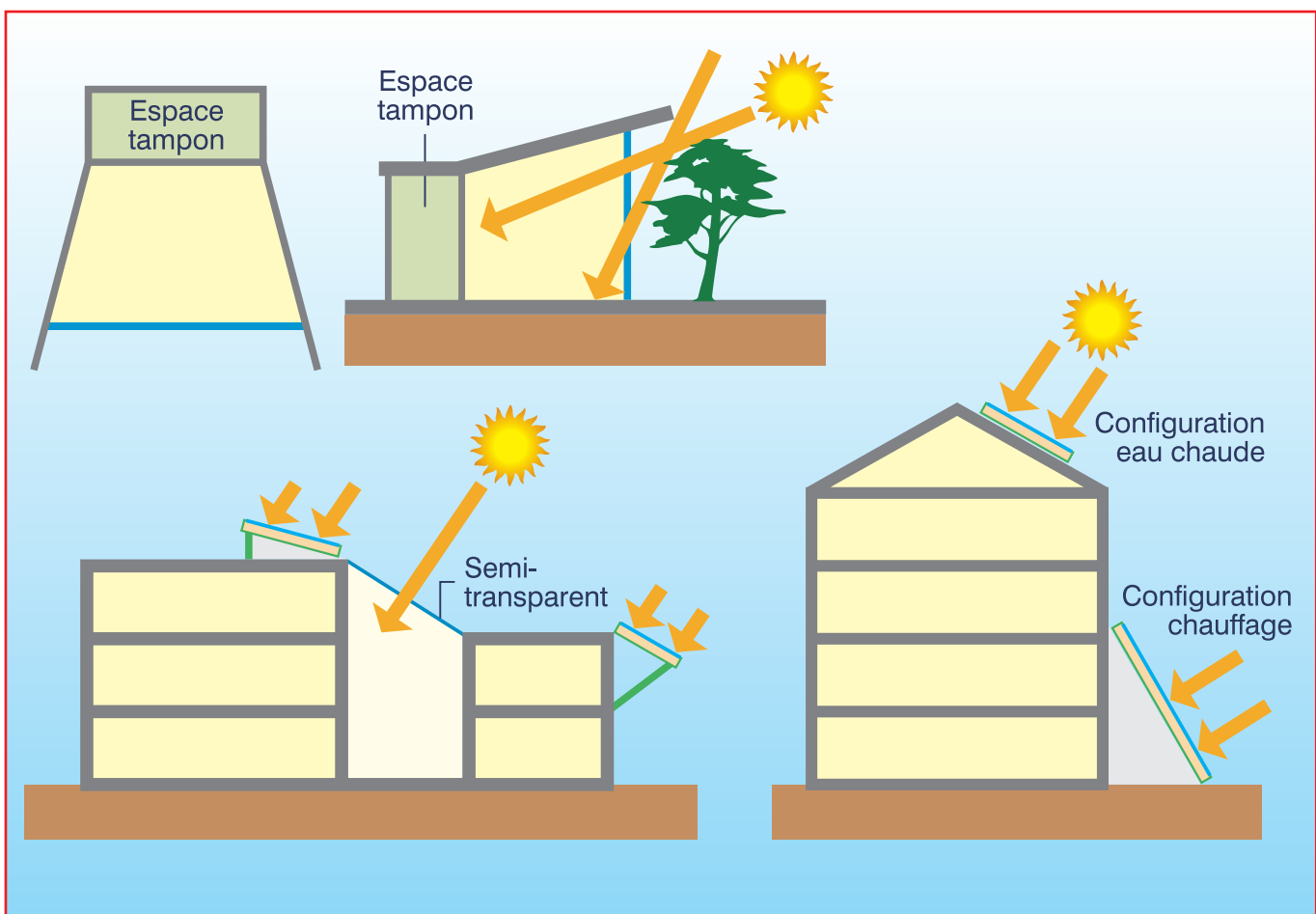
- électrification de sites isolés : le générateur photovoltaïque fonctionne de façon autonome avec un stockage intermédiaire dans des batteries ;
- connecté au réseau : la "centrale" photovoltaïque est connectée au réseau public par l'intermédiaire d'un onduleur.

Les panneaux photovoltaïques, couleur bleue ou brune, sont soit opaques soit semi-transparents, peuvent être intégrés dans une verrière et offrent des effets de lumière tamisée. Compte tenu de leur orientation et inclinaison, ils peuvent être utilisés comme protection solaire.

Intégrer les énergies renouvelables à l'architecture économise l'énergie et crée des emplois : c'est un acte de développement durable. Diverses méthodes de calcul européennes ont été développées pour aider l'architecte à optimiser son projet.



Panneaux photovoltaïques sur la façade Sud de la bibliothèque de Mataro (Espagne) (Architecte Miquel Brullet).



2 Exemples d'intégration des énergies renouvelables à l'architecture.

La méthode BREEAM, Building Research Establishment Environmental Assessment Method, a été mise au point en Angleterre en 1990 par le BRE, Building Research Establishment, pour évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment depuis sa conception jusqu'à sa démolition.

Cette méthode, du type "éco-points", est constituée d'une liste de critères et d'indicateurs. Cette liste de base a été développée de manière différente pour :

- les immeubles de bureaux ;
- les logements ;
- les surfaces commerciales ;
- les bâtiments industriels.

Chaque fois qu'un critère est rempli, un point est porté en crédit. La somme des points crédités fournit le résultat global des performances environnementales du bâtiment évalué.

À titre d'exemple, pour le critère "impact sur l'environnement local", la méthode BREEAM (version 1993) prévoit les indicateurs et crédits suivants pour l'évaluation des immeubles de bureaux :

- la conservation de l'eau : 1 crédit pour les bâtiments qui ont mis en œuvre des WC avec au maximum 6 litres de chasse ou un mécanisme d'économie d'eau aux urinoirs ; 1 crédit supplémentaire est accordé si les trois mesures sont observées ;
- la maladie du légionnaire : 1 crédit s'il n'y a pas de tour de refroidissement ou de condensateur ;
- les transports :
 - 1 crédit s'il y a un accès aisé pour les transports en commun ;
 - 1 crédit pour les bâtiments qui ont au moins mis en œuvre un endroit en sécurité pour placer les vélos, un endroit protégé des intempéries pour les vélos, certaines facilités pour le personnel roulant à vélo comme pendre et sécher les vêtements mouillés, prendre une douche.

En fonction du résultat obtenu, un certificat environnemental peut être délivré par un évaluateur agréé.

La méthode BREEAM peut être utilisée par tous les intervenants de l'acte de construire :

- par les architectes dès la conception du projet pour maîtriser les impacts environnementaux du bâtiment ;
- par les locataires ou le propriétaire pour optimiser la gestion du bâtiment ;
- par le propriétaire comme argument de vente pour démontrer la qualité du bâtiment.

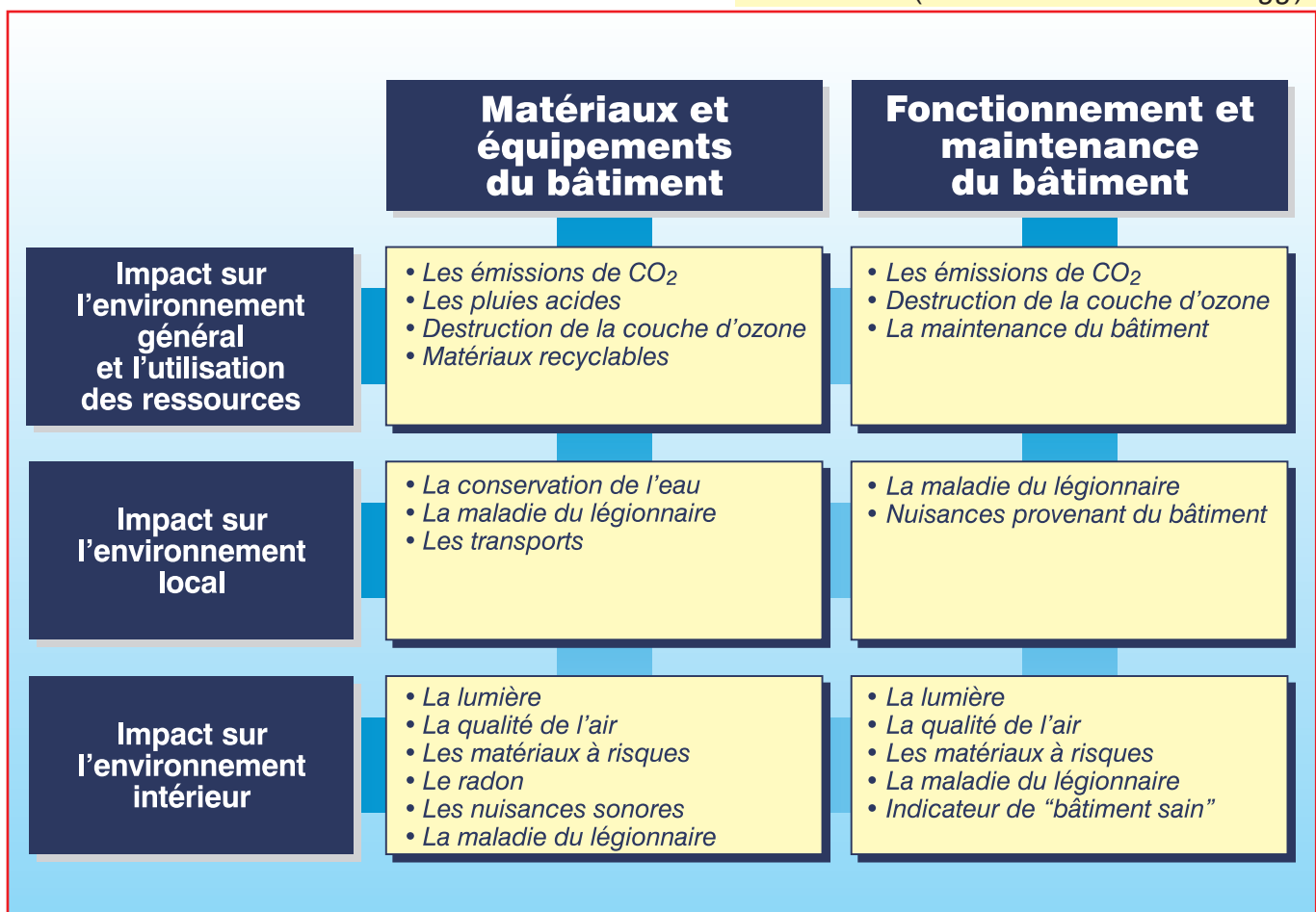
Cette méthode a été largement diffusée dans le monde (au Canada, en Norvège, à Hong-Kong...) et continue à faire référence pour le développement des méthodes d'analyse environnementale des bâtiments. Actuellement, plus de 25 % des immeubles de bureaux construits en Angleterre ont déjà utilisé cette méthode. Vu son succès, la méthode BREEAM a été mise à jour en 1998 et complétée en 2000 d'un nouvel outil, le logiciel ENVEST, pour calculer directement les impacts environnementaux du bâtiment.

Ainsi, le développement de la méthode BREEAM et l'utilisation qu'il en est faite démontrent qu'une approche volontaire peut contribuer largement à l'accomplissement des objectifs gouvernementaux.

La méthode BREEAM proposée dès 1990 en Angleterre permet d'évaluer les performances environnementales de différents types de bâtiments : immeubles de bureaux, logements, surfaces commerciales et bâtiments industriels.



1 Le Building Research Establishment (Watford - Angleterre) conçu selon la méthode BREEAM (Architectes : Feilden-Clegg).



2 Critères BREEAM pour les immeubles de bureaux (1993) (BRE).

Conscient des impacts générés par le secteur de la construction sur l'environnement, le " Plan Construction et Architecture ", cellule du ministère de l'Équipement et du Logement français, impulse dès 1993, sous le programme " Écologie et Habitat ", plusieurs réalisations expérimentales à " Haute Qualité Environnementale ". Outre l'intérêt de capitaliser des expériences valorisant une démarche plus globale de management environnemental des opérations de construction ou de réhabilitation, la concrétisation de ces projets pilotes doit servir de support pour :

- promouvoir des techniques constructives respectueuses de l'environnement ;
- valider des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux ;
- soutenir plus généralement la réflexion théorique à ce sujet.

À la suite des travaux menés, entre 1993 et 1998, au sein de l'Atèque (atelier d'évaluation de la qualité environnementale), il se dégage, en correspondance avec la norme NF EN ISO 8402 " Management de la qualité et assurance de la qualité ", une première définition de la qualité environnementale des bâtiments :

« La qualité environnementale d'un bâtiment correspond aux caractéristiques du bâtiment et du reste de la parcelle de l'opération de construction ou d'adaptation du bâtiment qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins de maîtrise des impacts du bâtiment sur l'environnement extérieur et de création d'un environnement intérieur sain et confortable ».

Ainsi, sur la base de cette définition formelle, une définition exigentielle a été constituée ; les objectifs poursuivis se déclinent en une liste "de travail" de 14 cibles (figure 2). Elles visent une plus grande qualité du cadre de vie pour les usagers et les riverains, et ce durant tout le cycle de vie du bâtiment. Chaque cible est décomposée ensuite en sous-cibles plus opérationnelles.

Cette démarche globale de management de projet visant à traduire le concept de "développement durable" dans le secteur du bâtiment s'inscrit également dans une recherche de la qualité : qualité architecturale, qualité fonctionnelle, qualité technique, pérennité, maîtrise des coûts...

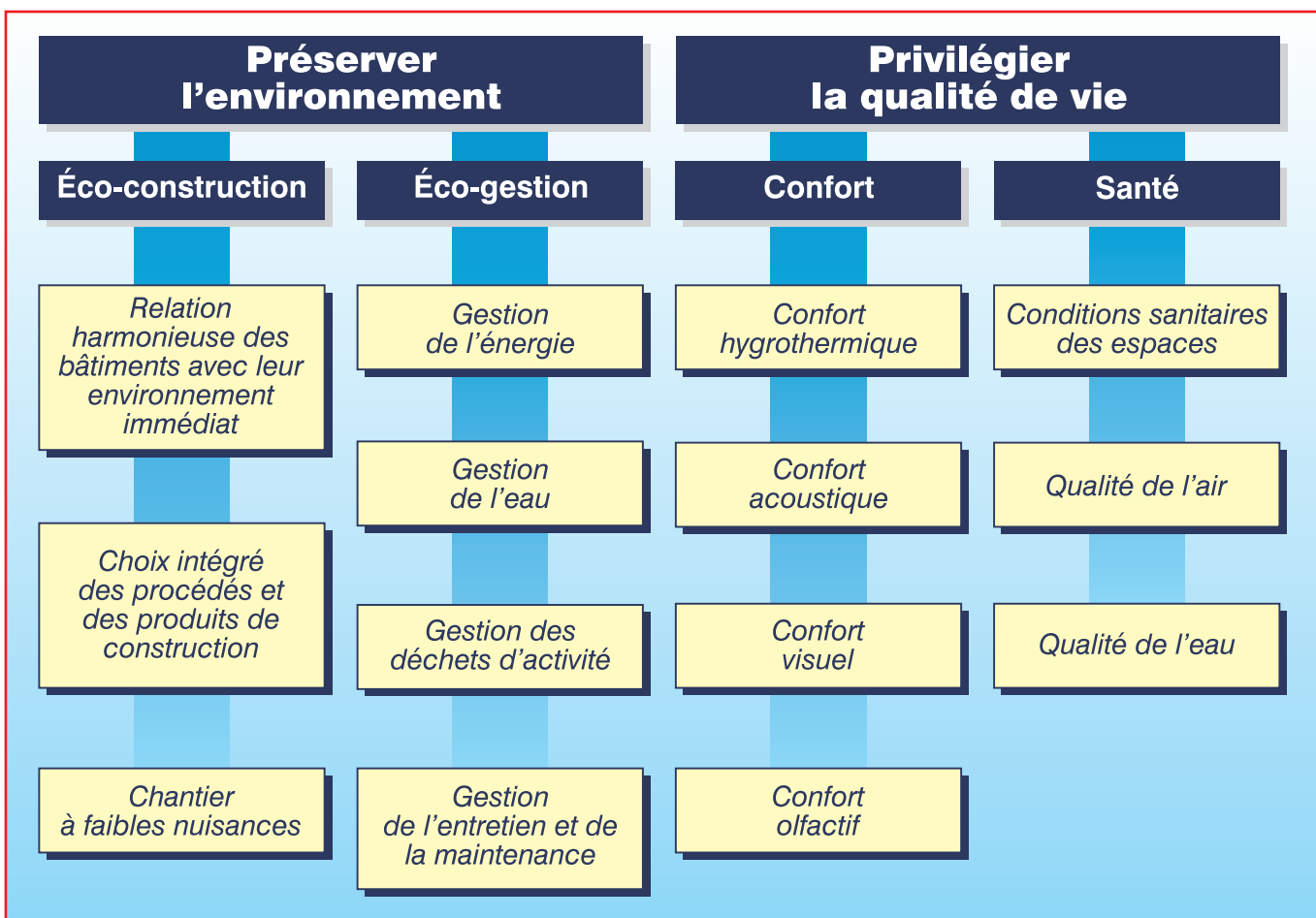
Afin de développer la Haute Qualité Environnementale des bâtiments neufs ou existants, l'association HQE fut créée en 1996. Elle fédère aujourd'hui directement ou indirectement la plupart des acteurs concernés par la démarche HQE.

Depuis 2000, la démarche HQE s'est largement répandue auprès des maîtres d'ouvrages publics. Sa structuration méthodologique se poursuit par la mise en place d'un référentiel portant sur le système de management environnemental et prochainement d'une procédure de certification de la démarche HQE.

La Haute Qualité Environnementale (HQE) est une démarche globale de management du projet visant à minimiser l'impact d'un bâtiment sur son environnement (intérieur, local ou global), durant l'ensemble de son cycle de vie.



Maison individuelle à Haute Qualité Environnementale située à Neuilly-sur-Seine (France) (Architecte Bruno Boschetti). **1**



2 Les 14 cibles de la Haute Qualité Environnementale des bâtiments (Association HQE).

Le standard de construction "Minergie" vise à promouvoir la construction ou la réhabilitation de bâtiments réduisant la consommation d'énergie non renouvelable tout en assurant des ambiances confortables et saines.

Ce standard fixe pour les immeubles d'habitation les exigences suivantes :

- chauffage + eau chaude sanitaire : 42 kWh/m².an. L'électricité destinée à la production de chaleur est comptée double ;
- électricité pour les appareils électroménagers : 17 kWh/m².an.

Ces objectifs peuvent être atteints en respectant les mesures suivantes :

- optimiser les gains d'énergie passive :
 - privilégier l'orientation sud pour les locaux de vie ;
 - régulation de la température de départ en fonction des conditions climatiques ;
 - optimisation des surfaces vitrées en fonction des orientations.
- minimiser les déperditions thermiques :
 - le coefficient de déperdition thermique des murs et de la toiture doit être au maximum de 0,2 W/m².K (isolation d'environ 15 et 25 cm) ;
 - le coefficient de déperdition thermique du sol doit être au maximum de 0,25 W/m².K (isolation d'environ 12 cm) ;
 - le coefficient de déperdition thermique des fenêtres doit être au maximum de 1 W/m².K.
Cette exigence s'accompagne également de mesures visant à limiter les ponts thermiques et à favoriser une volumétrie compacte.
- utiliser l'énergie de manière rationnelle :
 - privilégier l'installation d'une ventilation mécanique contrôlée équipée d'un échangeur de chaleur. Un ventilateur de 30 à 50 W devrait suffire pour une habitation ;
 - pose de vannes thermostatiques ;
 - production de chaleur à haut rendement (chaudière à condensation) ;
 - réduction de la longueur du réseau d'eau chaude.
- utiliser les énergies renouvelables :
 - pompe à chaleur ou chauffage au bois pour la production de chaleur ;
 - panneaux solaires pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire.

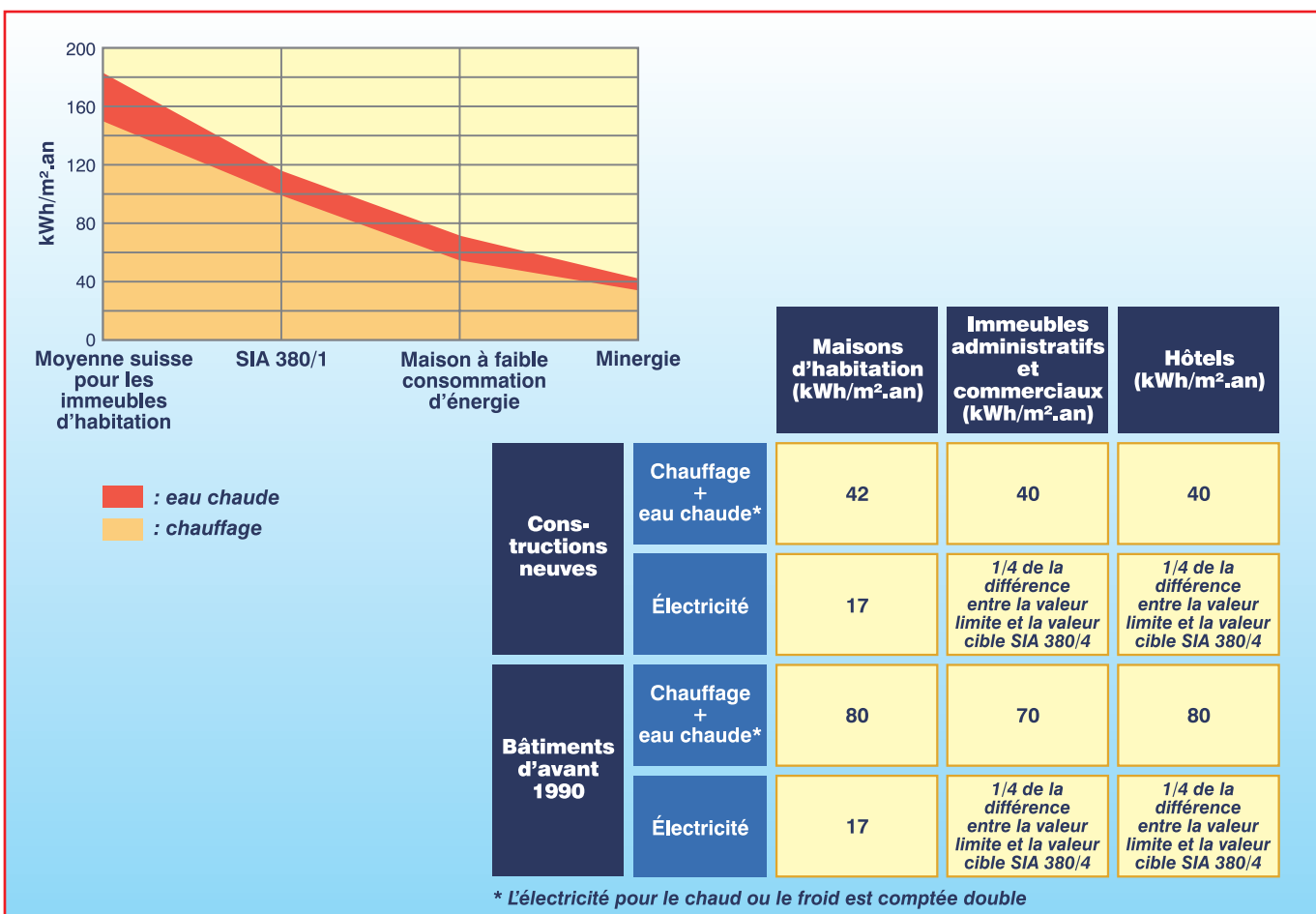
Plus de 1 500 logements sont aujourd'hui labellisés "Minergie" en Suisse. L'ensemble de ces mesures accroît le coût de construction moyen de l'ordre de 5 à 10 %, mais permet aux futurs propriétaires d'accéder à des prêts préférentiels auprès de plusieurs banques suisses.

Signalons qu'il existe également depuis peu en Suisse un autre standard de construction, appelé E-2000 Éco-construction qui cherche à prendre en compte, en plus des exigences énergétiques, des critères écologiques comme les matériaux, la gestion de l'eau, les transports ainsi que les coûts de construction.

Le standard suisse "Minergie" permet de réduire la consommation énergétique de plus de 30 % et d'atteindre 42 kWh/m².an pour le chauffage et l'eau chaude dans les habitations.



Maison individuelle à Bleienbach (Suisse) **1** conçue selon le standard "Minergie" (Architecte Daniel Starkermann).



2 Les valeurs limites du standard "Minergie" (d'après Minergie).

Le label allemand "Habitat basse énergie" définit un standard de construction visant à réduire la consommation énergétique des immeubles d'habitation tout en assurant un climat intérieur confortable. Ce label a donné naissance en 2002 à une nouvelle réglementation thermique allemande qui reprend les objectifs-cibles du label : 65 kWh/m².an pour le chauffage, 25 kWh/m².an pour l'eau chaude sanitaire, 30 kWh/m².an pour la consommation électrique. De plus, la réglementation demande qu'une "carte d'identité énergétique" du bâtiment soit communiquée lors de la location ou de l'achat d'un bâtiment.

Renforçant ses objectifs, "l'Institut pour l'Habitat Passif" de Darmstadt est à l'origine d'un programme européen visant à mettre au point un label européen "Habitat Passif". Ce label peut être atteint en suivant, lors de la conception du bâtiment, les principes (figure 2) suivants :

- Assurer une conception solaire passive des bâtiments :
 - la contribution solaire doit être égale à près de 40 % des besoins en chauffage ;
 - le coefficient de déperdition thermique du vitrage sera inférieur à 0,75 W/m².K. Sa valeur g sera au moins de 50 % ;
 - le coefficient de déperdition thermique des châssis sera au maximum de 0,8 W/m².K ;

Dans ce cas, le bâtiment doit être orienté au sud pour bénéficier des apports solaires. Les fenêtres envisagées sont pourvues d'un triple vitrage calorifuge et d'un châssis super-isolant.

- Renforcer l'isolation des bâtiments :
 - le coefficient de déperdition thermique de l'enveloppe doit être d'environ 0,1 W/m².K (valeur k ou υ) ;
 - les ponts thermiques seront limités à 0,01 W/mK au maximum (valeur ψ) ;
 - l'étanchéité à l'air de l'enveloppe sera au maximum de 0,6 h⁻¹ à 50 Pascal (valeur n_{50}).

Cette exigence s'accompagne donc de mesures visant à limiter les ponts thermiques et à favoriser une étanchéité maximale à l'air.

- Favoriser la complémentarité entre la récupération et les apports d'appoint de chaleur :
 - le débit d'aération d'hygiène est de l'ordre de 30 m³/h.personne ;
 - le rendement de l'échangeur de chaleur air-air doit être supérieur à 80 % ;
 - la puissance calorifique maximale pour la récupération de la chaleur latente doit être de l'ordre de 10 W/m².K ;
 - la température de l'air frais préchauffé doit être au minimum de 8°C.

Ces exigences conduisent les concepteurs à prévoir une ventilation double flux avec échangeur de chaleur.

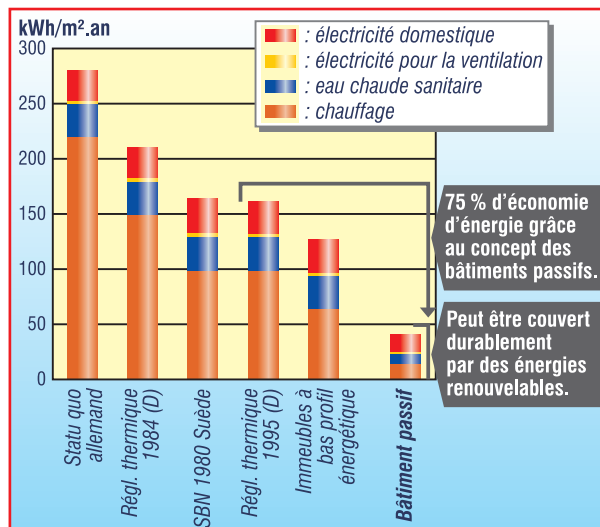
- Optimiser l'efficacité électrique des équipements :
- Utiliser les énergies renouvelables en appoint.

L'ensemble de ces mesures devrait conduire à réduire les besoins annuels de chauffage à 15 kWh/m².an et à 42 kWh/m².an au total (chauffage + eau chaude sanitaire + électroménagers).

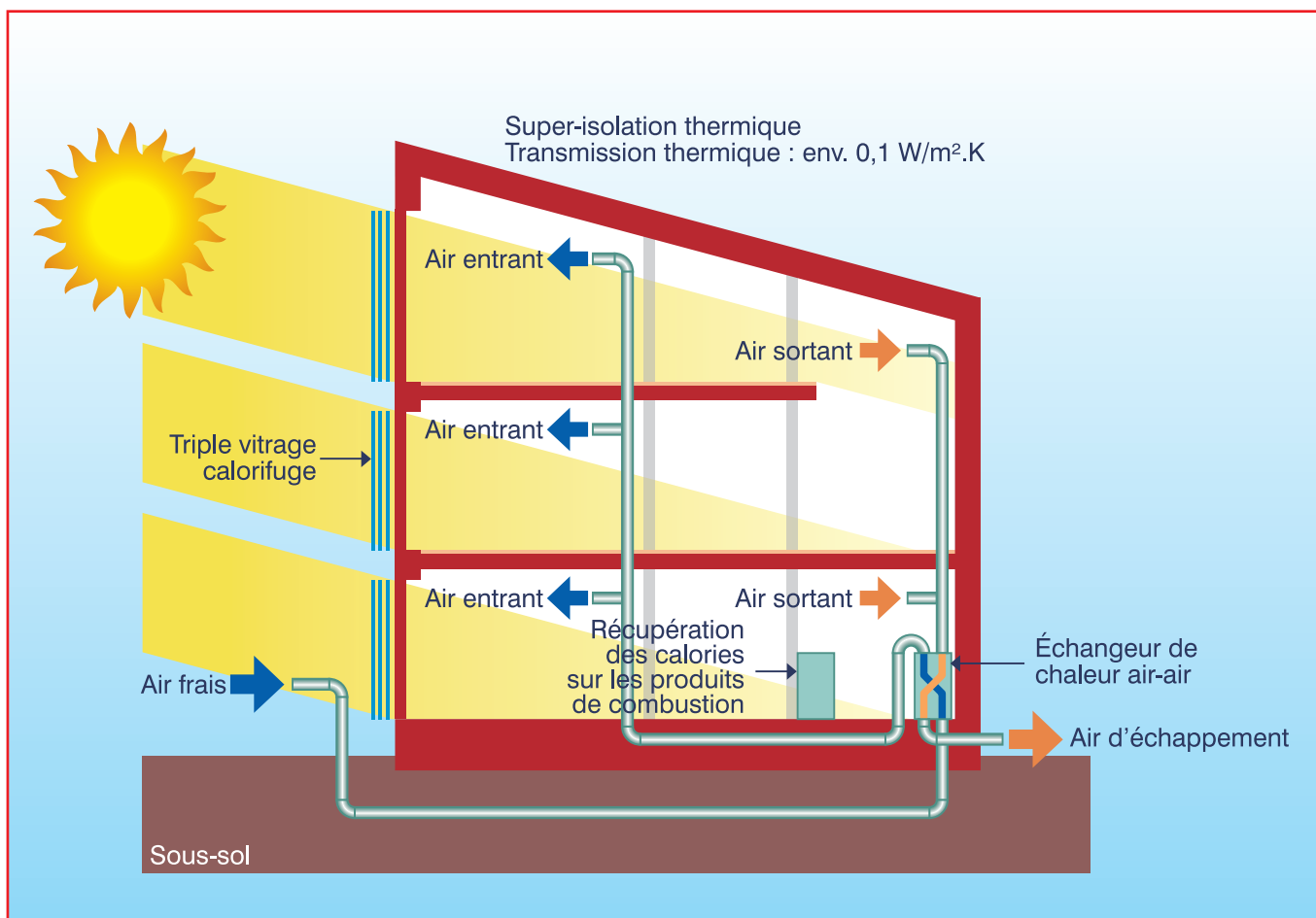
La mise en œuvre de ces exigences au niveau européen a fait l'objet ces dernières années d'un programme d'expérimentation appelé Cepheus (Cost Efficient Passive Houses as European Standards). La construction de 250 logements à travers l'Europe a permis de démontrer la faisabilité technico-économique de ce type de bâtiments.

La construction de "bâtiments solaires passifs" pourrait donc devenir dans les années à venir un standard de construction en Europe limitant ainsi le besoin total d'énergie finale pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité à moins de 50 kWh/m².an (environ 120 kWh/m².an d'énergie primaire). Une telle valeur équivaldrait en moyenne au tiers, voire au quart, des consommations énergétiques des immeubles d'habitation construits actuellement en Europe (figure 1).

Le label allemand "Habitat basse énergie" définit un nouveau standard de construction qui pourrait être à l'origine, dans les années à venir, d'une réglementation européenne.



1 Comparaison entre les indices de performance énergétique en kWh/m².an pour les immeubles d'habitations.



2 Principes constructifs et techniques d'un bâtiment passif en Allemagne (d'après Wolfgang Feist).

La nature telle que nous nous la représentons depuis la Renaissance semble en voie de **disparition** : la forêt vierge se morcèle ou brûle, les banquises reculent et la couche d'ozone est percée, le nombre d'espèces vivantes se réduit, la température moyenne et le niveau des océans montent, la ville s'étend partout, etc. De plus en plus de scientifiques travaillent à prouver que ces phénomènes sont liés au développement des activités humaines, principalement par le recours intensif aux énergies fossiles. Une nouvelle réalité moins hospitalière semble en émergence, qui résulte autant de phénomènes climatiques (El Niño, l'apparente multiplication des cataclysmes, etc.) que de mécanismes sociétaux (les pollutions urbaines, les crises industrielles [vache folle] ou sanitaires [sida, etc.], économiques [chômage], du mode de vie [déchets, embouteillages, déficit de la sécurité sociale]. **C'est la crise écologique.**

On s'intéresse à cette nature en voie de disparition. C'est ainsi qu'alors que les pollutions urbaines empirent avec l'intensification de la circulation automobile, le grand public se reconforte en se passionnant pour une **imagerie** de la Terre vierge, comme, par exemple, à travers les publications de sociétés géographiques ("Géo", "National Geographic"), dans le travail du photographe Yann Arthus-Bertrand (*La Terre vue du ciel*) ou par des émissions populaires comme "Ushuaïa". En architecture, de nouveaux **concepts** s'édifient, comme ceux de métropole, villes émergente, sur-urbain, etc. L'ébranlement de l'ordre écologique implique également une remise en question d'ordre symbolique. **C'est la crise de notre représentation de la nature.**

Il y a aussi la crise de nos modes de vie : d'un côté, l'espace **sur-urbain** : les villes explosent, les échanges et la circulation s'y intensifient, les risques et catastrophes s'y multiplient. Le sentiment d'insécurité se propage (violence, bruit, risques sanitaires et économiques, etc.). De l'autre côté, le développement du **sub-urbain** : fuyant l'agitation des centres villes, les nouveaux urbains s'installent à distance, en banlieue, dans la périphérie où ils tentent de retrouver un rapport concret à la "nature" (c'est le mythe du pavillon) et de gérer leur rapport aux autres par la mobilité (principalement par l'automobile). Cette tendance lourde dans la gestion de l'espace entraîne un cercle vicieux (consommation et pollution accrues, temps perdu, risques supplémentaires, coûts d'infrastructure, etc.). **La prise de conscience de l'ampleur des conséquences écologiques de nos modes de vie conduit à se demander dans quelles conditions la vie sur Terre sera encore possible demain.**

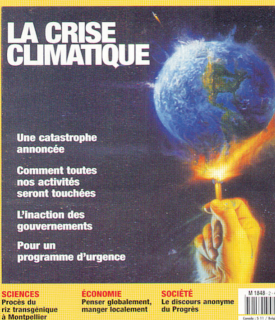
La révolution industrielle s'est intéressée à la question du "comment produire" et a instrumentalisé la nature (réservoir de ressources et puits de déchets), qu'elle a pensé en termes de quantités ("combien") et non en termes d'environnement ou de lieu ("où"). La nature est réduite à un **objet** manipulable (la "chose étendue" de Descartes) et cesse d'être considérée comme le **milieu** de notre propre vie, c'est-à-dire l'ensemble des rapports matériels et symboliques propres à l'existence humaine et tissant l'"écoumène" (A. Berque), c'est-à-dire notre rapport à la Terre en tant qu'elle est habitée par nous.

La question de "comment habiter" n'a été reprise qu'au début du xx^e siècle par des penseurs comme M. Heidegger, suivis de H. Arendt, E. Levinas, J. Derrida, etc. La géographie s'est aussi intéressée à la pensée de l'habiter, notamment à travers E. Dardel et, plus récemment, A. Berque. Aujourd'hui, la question est devenue actuelle au point que des animateurs de télévision comme N. Hulot co-écrivent des textes sur le sujet.

Penser l'habiter a deux implications majeures : (a) la Terre n'est pas un objet comme les autres : c'est l'unique **lieu concret** de notre monde ; (b) habiter implique **co-habiter** car l'espèce humaine est historiquement un fait social ; cette co-habitation est le **lieu symbolique** de notre être-au-monde. En tant qu'habitants de cette Terre-ci, la crise environnementale (« comment gérer l'espace, les déchets et sous-produits de notre mode de vie ? ») s'accompagne d'une crise symbolique (« comment penser notre monde et notre mode de vie ? »). L'architecte intervient ici comme le catalyseur d'une pensée collective qui n'est pas déléguable à la sphère individuelle car personne n'habite jamais seul... À la problématique de la gestion des quantités (de CO₂, de kWh ou d'♾) correspond donc pour l'architecte et l'urbaniste un questionnement symbolique (quel projet urbain ? quel projet individuel ?), c'est-à-dire une question qui porte sur notre capacité à nous inscrire en tant que sujet, individuellement et collectivement, dans notre temps et dans notre espace. C'est bien cela, l'habiter.

Il faut penser l'habiter non plus comme un "habiter sur", mais comme un habiter au plein sens transitif où l'acception première ("se loger") rejoint le sens figuré ("remplir", au sens d'être habité par une pensée, un sentiment) ; non plus comme un "habiter seul", mais comme un "co-habiter". Ce qu'il faut tenter de penser aujourd'hui, c'est comment **co-habiter la Terre**, c'est-à-dire parmi les hommes et parmi les choses.

HABITER SUR TERRE

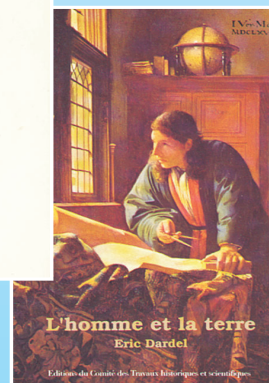


inter-dépendance



CIEUX

corps



TERRES

être seul

matière

EAUX

CO-HABITER LA TERRE

Revue l'Écologiste - La Terre vue du ciel - Revue Neuf-Nieuw - Revue Newsweek - Lotissement américain - Revue Tests-Achats - Déchetterie - Trois références bibliographiques.

La crise écologique signifie que la terre entière est mal-habitée. *Ce que la crise écologique peut susciter en nous, c'est qu'on ne peut habiter le monde² sans d'abord habiter la Terre¹ (ce qui va plus loin qu'habiter sur Terre), c'est-à-dire **habiter ses sols, ses eaux, ses ciels, ses énergies**. La Terre est l'unique fondement concret de notre monde. L'architecture est un choix historique qui vise à rendre le monde² et la Terre¹ habitables par les hommes. Certaines sociétés n'ont pas fait ce choix et habitent la Terre sans construire. Inversement, beaucoup de bâtiments ont été construits qui sont en fait inhabitables. Le choix historique de l'architecture appelle donc la construction sans se limiter à construire; il appelle aussi l'habitation sans se limiter à habiter: architecturer, c'est **construire en habitant**.*

L'homme lui-même n'est pas un être au-dessus de la matière (le "possesseur et maître" de Descartes): Homo erectus est aussi un fait zoologique. Sa capacité spécifique d'être-pensant et d'être-social n'est pas fondée sur une autre matière. C'est bien la même nature qui le fabrique au plus intime³. Même la culture (la "seconde" nature), en tant que processus historique lié à l'évolution de la vie biologique, est un fait de nature⁴.

L'architecture est un des lieux du **rassemblement** dans le temps de ces matières consubstantielles, une discipline par laquelle la pâte humaine, indissociablement faite de biologie et d'usages, rencontre⁵ concrètement la matière de la Terre (astronomie, géologie, météorologie, etc.) et partage un fondement commun (chimie, physique). Plus que d'autres disciplines (voir Hegel), l'architecture reste en prise avec la valeur et le poids de la matière (on manipule toujours des masses et des corps) et de la Terre (on construit toujours quelque part). Parce que l'architecture *n'est pas* sans être fondée sur la Terre, il importe aujourd'hui, face à la crise écologique, de faire en sorte que l'architecture puisse contribuer davantage à la sauvegarde des conditions de vie résultant des équilibres écologiques concrets que nous connaissons.

Cette **souche concrète commune** est mieux connue aujourd'hui par les sciences. Deux phénomènes essentiels caractérisent pour l'architecte la matière de la Terre: la **gravitation** et la rotation autour du **soleil**. Le premier crée un espace **ordonné**, le second crée un espace **orienté**. Le premier donne consistance à la Terre (masse, solidité, etc.) et aux espèces vivantes (notamment la station debout chez l'homme). Le second a permis la constitution de son atmosphère et le développement de la vie. La rotation autour du soleil implique la mesure du temps (année solaire), les climats (saisons, régions climatiques), les flux de matières à la surface de la terre (le vent, la pluie, l'érosion résultent de différences de pression et de température dans les masses de gaz constituant l'atmosphère), la rotation de la Terre sur elle-même suscite des fonctions biologiques fondamentales (rythmes circadiens, etc.). Pesanteur et mouvement, ombre et lumière, chaleur et fraîcheur, ciel et soleil, opacité et complexité, rythmes biologiques, voilà les matières mises au travail par l'architecture... et mises à mal par une construction ou un usage irrespectueux de l'environnement.

Ces faits de nature suscitent des faits de culture à distance de la nature. Le chais viticole de Gilles Perraudin confie à la texture grenue d'une pierre locale le soin de révéler les âges géologiques sous la lumière du midi. L'architecte Louis Kahn parle de l'ordre de la brique pour évoquer que la pesanteur, appliquée à la brique, conduit à ce que celle-ci soit disposée selon une logique suscitant l'arc, la voûte, etc. et fabriquant des cultures constructives spécifiques. L'architecture du mexicain Luis Barragán est basée sur la rencontre des éléments les plus simples: lumière et couleurs, ciel et eau, textures solides et transparences... La maison Büchel (arch. Baumschlager & Eberle) s'ordonne aux qualités du site et de son orientation Sud. Le travail de Gaudí (parc Güell) explore la forme parabolique selon l'ordre de la compression. Reconnaître que l'architecture est ancrée dans des faits de nature n'implique pas que l'architecture soit comme la nature, de même que la réalité d'un territoire ne se réduit pas à la réalité de la carte qui le décrit.

Aujourd'hui, alors que les équilibres naturels sont mis en cause par le sur-développement de certaines activités humaines, **la responsabilité de l'architecte dans la maîtrise des quantités matérielles** (économie fonctionnelle, performances de confort et d'énergie et maîtrise des pollutions, gestion des matériaux et des déchets, etc.) est mise en avant: dans l'équilibre global, il est co-décideur, donc co-responsable, par rapport aux faits de nature (pollutions, équilibres écologiques, etc.). C'est précisément la voie suivie par **HQE**: contribuer par le jeu "savant et magnifique" de l'architecture au respect des équilibres naturels concrets qui rendent l'habiter possible.

1. **Terre**: l'étendue, l'environnement, les faits de nature comme s'ils étaient "deshabités" par l'homme. C'est en fait une abstraction car penser la Terre ne peut se faire sans l'habiter.
2. **monde**: cette étendue en tant qu'elle est habitée par l'homme et rendue historiquement appropriable par ses pratiques sociales et économiques. C'est notre expérience quotidienne.
3. Rappelons les récits de la création de l'homme dans la Genèse ("Il cracha dans la boue"); considérons aussi l'étymologie, qui rapproche "homme" de "humus", etc.
4. La nature conçue comme quelque chose laissé vierge par l'homme, comme un reste d'intouché sur terre et donc comme fondamentalement étranger à l'homme, résulte d'une abstraction dualiste.
5. Certains parleront d'*osmose*, d'autres de *confrontation*... Nous parlerons d'inscription, de ré-écriture, de palimpseste.

L'ARCHITECTURE C'EST DE LA MATIERE



L'ARCHITECTURE C'EST DE LA NATURE

Exeter Library (Architecte L.I. Kahn) - Chai viticole (Architecte G. Perraudin) - Parc Güell (Architecte Gaudi) - Casa Galvez (Architecte L. Barragan) - Haus Büchel (Architectes Baumschlager et Eberlé).

L'habiter sur terre ne se réduit pas à tenir compte de l'environnement naturel. L'espèce humaine n'habite pas le lieu de la terre comme le ferait n'importe quelle autre espèce animale. Elle habite aussi le lieu du langage, c'est-à-dire qu'elle est dotée d'une faculté de représentation des choses. Par l'accès au langage, l'espèce humaine est donc articulée *naturellement* (c'est-à-dire par la complexification de son corps animal) à la culture : c'est cela le fait humain. Toute architecture de haute qualité environnementale se double donc d'une autre ambition, la *haute qualité humaine*.

La faculté langagière, propre à l'humanité, est doublement paradoxale :

1. d'un côté elle permet de vivre à la fois ici *et* là (c'est-à-dire dans le réel et dans l'imaginaire, dans le proche et dans le lointain), de l'autre côté elle ne permet pas de ne vivre qu'ici *ou* là (uniquement dans le réel, comme les animaux, ou dans l'imaginaire, comme les fous) : l'espace vécu est toujours à **l'intersection**.
2. Le lieu du corps animal (chaque "individu" matériel) ne correspond pas au lieu du corps social (chaque "personne" en tant qu'elle est liée aux autres par des relations propres qui la constituent comme telle, notamment à travers l'apprentissage, les échanges, etc.) ; tous les êtres humains font l'expérience d'une tension irrésolue entre la **séparation** (l'"individu" face à la "masse") et **l'appartenance** (la "personne" dans sa "communauté").

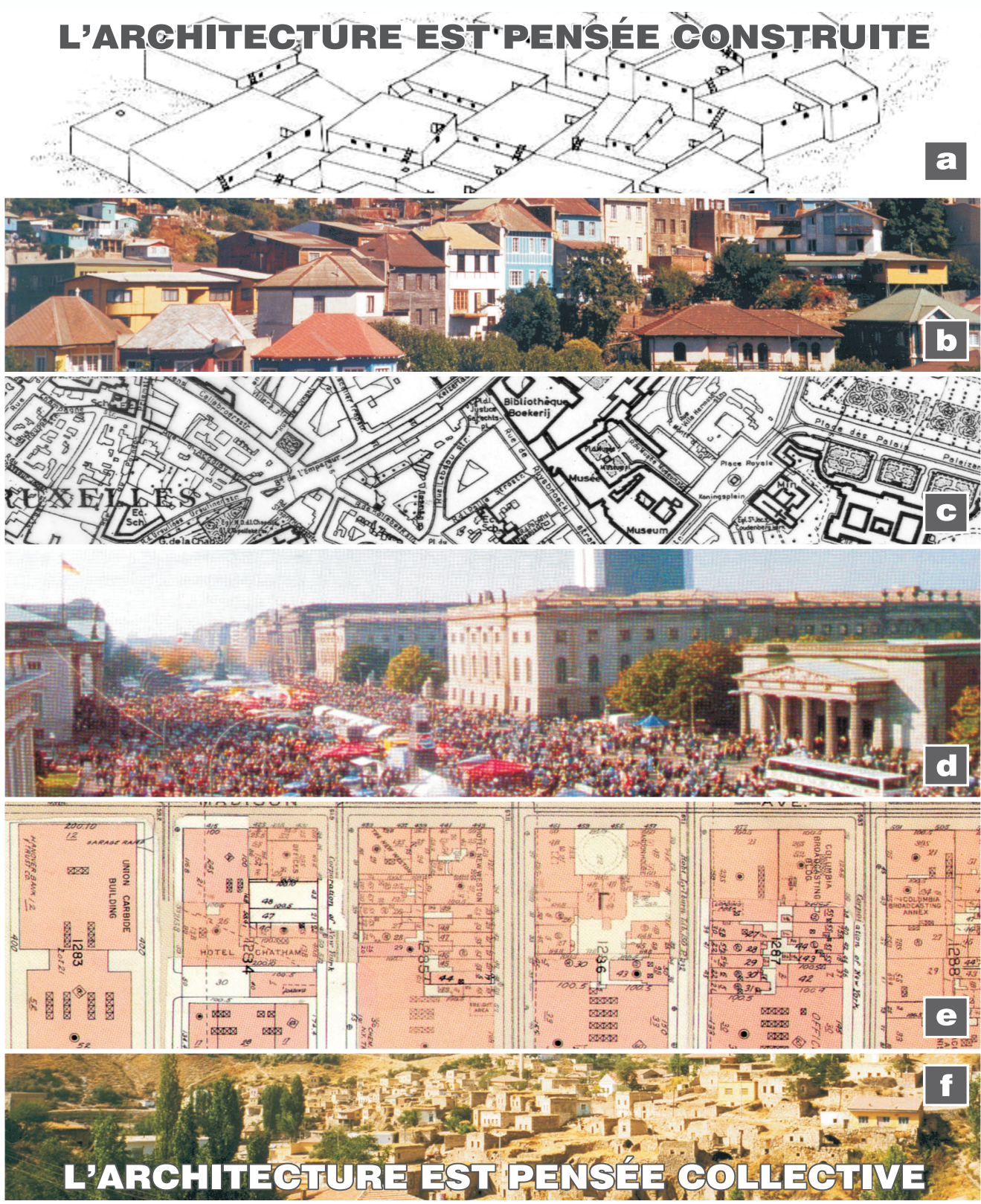
La première dimension du fait humain, c'est qu'il est **social** par nature. Pour A. Leroi-Gourhan, l'architecture s'est proposée d'emblée [ill. a], comme la concrétisation du fait culturel dans l'espace et dans le temps. Comme le social précède l'individuel, la pensée de la ville et de l'urbain (comme articulation spatiale des relations sociales) précèdent la pensée de l'architecture (comme objet autonome). Autrement dit : **la ville précède la cabane**. Comme le langage et la culture, l'architecture capitalise la mémoire, la technique, les modes de vie, mais c'est pour la rendre disponible à tous sous forme concrète et matérielle. Elle permet ainsi au fait social de traverser le temps (durabilité concrète) et les générations (durabilité humaine) en se maintenant et en s'enrichissant. Cette dimension est présente partout sur la Terre, dans les sociétés dites "modernes" (ill. e : Manhattan) comme dans les sociétés traditionnelles (ill. f : Turquie-Cappadoce), de manière dirigée (ill. c/d : quartier royal à Bruxelles, urbanisme prussien à Berlin) ou spontanée (ill. b : Valpareiso).

Parallèlement, en Occident, l'architecture est aussi le lieu de l'émergence de la **conscience de soi**. Dans l'antiquité, l'architecture de l'habiter permettait le "vivre-ensemble" et laissait au *monument* le soin de concrétiser le "mourir-seul" (les pyramides, les tombes mésopotamiennes et grecques, etc.). Aujourd'hui, cette situation semble renversée : la ville, le collectif semble le lieu d'un passé devenu encombrant en voie de "disneyification", alors que la culture de l'égo s'exprime dans l'architecture. À travers la fascination occidentale pour le modèle pavillonnaire individuel, les articulations historiques du fait social sont attaquées : incapable de penser le collectif, on ne pense que des collections...

L'architecture est historiquement une des concrétions de ce fait social : l'espace architectural (donc urbain) concret est le lieu des arbitrages entre les individus et les communautés et *organise le basculement continu* entre le *vivre ensemble* et le *vivre seul* par la construction d'*échelles intermédiaires* (espaces domestiques, semi-publics, rues, places, lieux représentatifs, etc.) répondant aux constructions symboliques propres à chaque société (famille monoparentale, nucléaire, polygame, clanique, institutions politiques, systèmes économiques, etc.). L'architecture de la ville occidentale construit des séquences de collectifs fondés sur des logiques historiques et proprement architecturales et urbaines, mais qu'on pourrait comparer aux lois de constitution chimique des acides aminés : une base (la maison, l'immeuble, etc.) permet, grâce à des règles d'intercompatibilité (mitoyenneté, distances, gabarits, etc.) une variation infinie (permettant l'invention, l'identification et l'individuation) tout en construisant des collectifs dont la nature et les propriétés sont radicalement autres que celles de ses éléments : places, rues, lieux publics permettent la co-habitation et le partage des valeurs collectives tout en nommant l'individu comme tel et le faisant advenir comme figure élémentaire.

L'habiter durable est donc fondé autant sur les faits de l'environnement que sur ceux du social : il vise à habiter ces deux lieux, c'est-à-dire à y construire du sens : corps, énergie, eau, etc. (quantités) et social, individus, communautés, histoire, etc. (qualités). Elle est dans l'articulation de la chose au sens (qui n'est pas la simple attribution fonctionnelle d'un sens à un signe). **L'architecture durable est donc architecture relative, relationnelle**. Elle est dans la matière, mais pas seulement ; elle est dans le fait social, mais pas seulement. En tant qu'elle est relationnelle, elle organise nos rapports au milieu selon le double axe de profiter *du* milieu (bénéficier, se protéger) et de profiter *au* milieu (faire bénéficier, protéger).

L'ARCHITECTURE EST PENSÉE CONSTRUITE



L'ARCHITECTURE EST PENSÉE COLLECTIVE

Reconstitution de Çatal Hüyük - Valpareiso au Chili - Extrait du plan de la ville de Bruxelles - Fête de la réunification à Berlin (1990) - Extrait du plan de Manhattan - Village de Cappadoce.

Habiter, c'est être quelque part : l'architecture tient aux lieux. Les lieux ne sont pas la matière elle-même : ils sont ce qui lui permet d'advenir. Cette distinction remonte à Platon, pour lequel le lieu est une des trois catégories fondamentales (à côté des êtres idéaux et des êtres concrets). Les choses, les êtres, les idées même ne sont pas sans être quelque part. Cet être-quelque-part dispose les êtres et les choses *relativement* les uns aux autres et leur permet de prendre place, d'*avoir lieu*.

Être quelque part, c'est être dans l'espace et le temps. Le lieu est une valeur spatiale (ici) liée et ramassée dans une valeur temporelle (maintenant). Saint Augustin distinguait trois temporalités : le présent des choses passées, le présent des choses présentes et le présent des choses à venir. On pourrait le paraphraser en distinguant également trois spatialités : l'ici des choses proches, l'ici des choses lointaines et l'ici des choses absentes. Dans l'expérience concrète de l'habiter humain, ces temps et ces spatialités se subsument : le présent des choses passées, présentes et à venir co-habitent avec l'ici des choses proches, lointaines et absentes. Le paysage le plus élémentaire (ill. a) rassemble, pour qui y prête attention, le temps long de la géologie (massif calcaire), le temps court de la météorologie (plein soleil), le temps de l'avenir (les récoltes à prévoir), de même que l'ici proche (mon point de vue), lointain (l'horizon), ou absent (la technique nécessaire à la prise de vue, par exemple). Les paysages dits "suburbains" actuels (ill. b) renvoient toujours à du lointain (la ville plus ou moins proche, par l'omniprésence des voies de circulation) et offrent peu de qualité dans l'ici proche ; les paysages urbains présentent la situation inverse, où le lointain n'existe que sous la forme du ciel, sauf dans quelques situations exceptionnelles, comme Hong-Kong (ill. c).

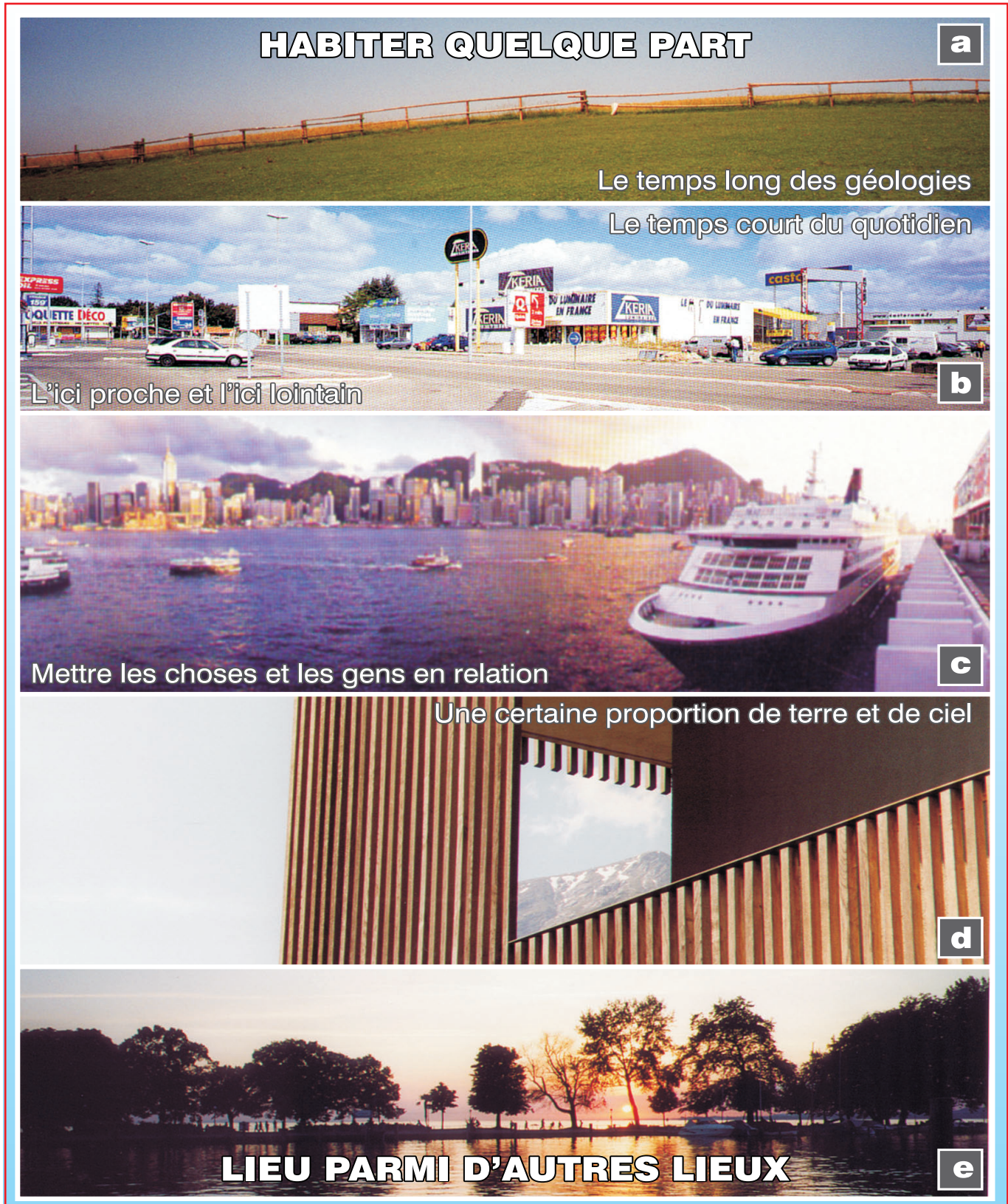
Les lieux concrets sont autant des lieux pour la matière que pour l'humain. De la même manière qu'habiter implique habiter la matière et le fait social, le lieu ne se réduit ni à la pure *objectivité* matérielle (le *topos* aristotélicien, habiter 43°18N [Marseille] ou 48°50N [Paris]) ni à la pure *subjectivité* humaine (le Marseillais contre le Parisien, la ville dite *générique*, les "beaux quartiers" ou la "zone"). Le lieu, au contraire, est la matrice qui tisse un incessant aller-retour entre la matière et l'humain, l'objectif et le subjectif : il leur permet d'exister en relation réciproque.

La notion de lieu implique donc de considérer en même temps la chose et notre relation (par l'habiter) à la chose. C'est en effet l'habiter humain qui investit d'identité la matière. C'est ainsi que l'homme inscrit son histoire (personnelle ou collective) dans l'espace et le temps, par le mécanisme de l'appartenance (identification et différenciation) à des collectifs (peuples, terres, lieux, etc.). Parler de lieux, c'est reconnaître l'environnement brut en tant qu'environnement vécu, c'est à dire en paysage.

Ainsi, le lieu n'a pas de valeur absolue : ici n'est ici que par rapport à là-bas. L'expression française "quelque part" rend justice à cette qualité fragmentaire du lieu. Chaque lieu est une certaine proportion d'air et d'eau, de terre et de ciel (ill. d et e) qui résiste à toute logique : rien n'est plus particulier (moins universel) que chaque lieu. En même temps, chaque lieu est lié à d'autres lieux : aucun n'est réductible au statut d'objet ou de fétiche. En ce sens, le lieu ne sera jamais moderne. De la même manière qu'un texte ne se comprend que dans un contexte, *tous les lieux sont liés les uns aux autres*, les uns par les autres et forment, ensemble, un *milieu*.

Le milieu se caractérise par sa capacité d'englobement spatial et temporel : il est toujours *déjà là* avant dans notre propre espace-temps personnel, c'est-à-dire qu'il nous précède physiquement, mais aussi symboliquement (dans le commerce des sens et valeurs qui nous sont inculqués par l'apprentissage et l'expérience). Son moteur central est la tradition (au sens de passer d'une génération à l'autre) : il procède par accumulation, par accrétions successives et non par substitution (comme le fait la technologie). En ce sens, il n'est jamais obsolète. Il est pure structure de recyclage. Quand à lui, **le lieu implique toujours un apprentissage :** chaque lieu est une histoire singulière, dont témoigne la toponymie. Plus particulièrement, chaque ville est le dépliement d'une histoire humaine à l'intersection du réel des lieux.

Les milieux sont ces motifs que nous fabriquons par le simple fait d'exister en tant qu'humains et qui nous fabriquent en retour comme nous sommes. **Cette circularité signifie que les lieux et les hommes sont liés :** les lieux ne sont pas de simples objets, là ; eux et nous-mêmes participons d'une même situation. Ces phénomènes circulaires (ou auto-référentiels) sont propres à l'action des êtres vivants et ont fait l'objet de recherches dans des domaines aussi variés que la biologie, la socio-linguistique, la psychologie ou l'écologie. Le réchauffement global en est un exemple : action de l'homme sur l'environnement (production de CO₂) et retour de l'environnement sur les modes de vie (modification des conditions d'habitabilité, etc.).



Paysage rural en Bavière - Périphéries - Baie de Hong-Kong - Logements sociaux à Innsbruck - Autriche (Architectes Baumschlager et Eberlé) - Lac de Constance.

Les lieux que nous habitons aujourd'hui ne ressemblent pas à ceux d'hier : d'un côté, les hauts-lieux traditionnels en voie de **muséification** (centres urbains, sites touristiques classés, etc.), de l'autre, l'espace moderne et ces autres lieux que sont les périphéries, "cités", banlieues, suburbs, edge-city, et autres **non-lieux**.

La muséification des sites et des villes (de qualité et authentique, comme à Venise, ou parodique, comme à Las Vegas) transforme les lieux en objets et les fétichise : les relations vivantes qui fabriquent les milieux sont coupées de leur propre fond, taxidermisées. Ces lieux cessent d'être les matrices actives de nos relations aux choses et aux gens. Ils sont réduits à de la **forme pure**. Las Vegas (ill. a) offre à cet égard un exemple terrible, avec sa collection de "bonsaï urbains" (mini-Venise, mini-Paris, mini-New York, mini-Gyzehe, etc.). Les grands centres commerciaux fonctionnent sur le même mode de la parodie ou du pastiche et les formes de l'architecture y sont réduites à de purs signifiants.

Les centres urbains ont été rendus inhabitables par le sur-développement de l'automobile (ill. b) : bruit, danger permanent de l'accident, envahissement des rues, multiplication des percées routières, autoroutes urbaines, congestion du trafic, etc. La qualité de vie urbaine a considérablement perdu ce qui la caractérisait : sécurité, proximité, propreté, etc. Les habitants tendent à fuir la ville pour retrouver une autre qualité de vie à distance du centre... Il s'agit d'un exode urbain qui produit la ville suburbaine et renforce son propre développement puisqu'il implique plus de circulation automobile, dont plus d'exode suburbain, etc. Ce faisant, les mécanismes spatiaux de ségrégation sociale ont changé. Avant l'automobile, il s'agissait d'une ségrégation verticale : les différentes catégories sociales vivaient les unes au-dessus des autres¹ (du commerce au bel-étage, jusqu'à la chambre de bonne...). Aujourd'hui, la ségrégation est devenue **horizontale** : chacun habite une portion de territoire socialement "épurée" (des "villas" parisiennes aux "gated communities" américaines (ill. c) ou brésiliennes, des favelas aux cités sociales, etc.)... Ce mode de ségrégation a été rendu possible par le développement des transports, de même qu'il le suppose en retour et le renforce...

Les **non-lieux**, ce sont aussi bien les installations nécessaires à la circulation accélérée des personnes et des biens (ill. d) (voies rapides, échangeurs, gares, aéroports) que les moyens de transports eux-mêmes (voitures, trains ou avions). Mais également les grandes chaînes hôtelières aux chambres interchangeable, les supermarchés ou encore, différemment, les camps de transit prolongé où sont parqués les réfugiés de la planète. Le *non-lieu* est donc tout le contraire d'une demeure, d'une résidence, d'un lieu au sens commun du terme.

L'approche que nous proposons ici d'un rapport à l'environnement fondé sur les notions de l'habiter et du lieu révèle un "angle mort", un "non-dit" fondamental : si nous pouvons parler d'habitants et de lieux, nous devons aussi reconnaître qu'il existe des **non-habitants** et des **non-lieux**. C'est-à-dire que nous partageons notre environnement avec des entités dont le mode d'installation spatiale ne vise pas l'habitation, mais l'exploitation des lieux.

Les centres urbains sont davantage occupés aujourd'hui par des non-habitants : principalement les institutions publiques et privées dont les intérêts directs sont étrangers au vivre-ensemble propre à l'urbain. Ces institutions (cités administratives, centres commerciaux, quartiers d'affaires, etc.) ne fonctionnent que la journée et sont morts la nuit. Pour ces institutions, qui chassent les habitants des noyaux urbains, la ville est une vitrine où s'acheter une place au soleil du marché. L'évolution de la pression foncière rend la ville de plus en plus inabordable... L'espace de la ville est progressivement privatisé au dépens de l'espace citoyen... Il s'agit d'une véritable mystification qui prétend voir dans l'espace consumériste du shopping le prolongement de l'espace citoyen de la ville...²

L'utilisateur du *non-lieu* entretient avec celui-ci une relation **contractuelle** symbolisée par le billet de train ou d'avion, la carte présentée au péage ou même le chariot poussé dans les travées d'une grande surface (ill. e). Dans ces non-lieux, on ne conquiert son anonymat qu'en fournissant la preuve de son identité : passeport, carte de crédit, chèque ou tout autre permis qui en autorise l'accès².

Ainsi, **la logique moderne utilitariste et industrielle** a altéré la perception que nous avons des lieux et les a réduits à la simple description quantitative de certaines de leurs propriétés. Par exemple, depuis les accidents routiers du Mont Blanc et du Gothard, on a quasiment réduit la gestion des vallées alpines au contrôle de leur capacité de transport routier... Les énormes problèmes de circulation urbaine sont eux aussi réduits à des questions de capacité de voirie, en passant sous silence tous les "dégâts collatéraux" sur la ville de l'invasion automobile...

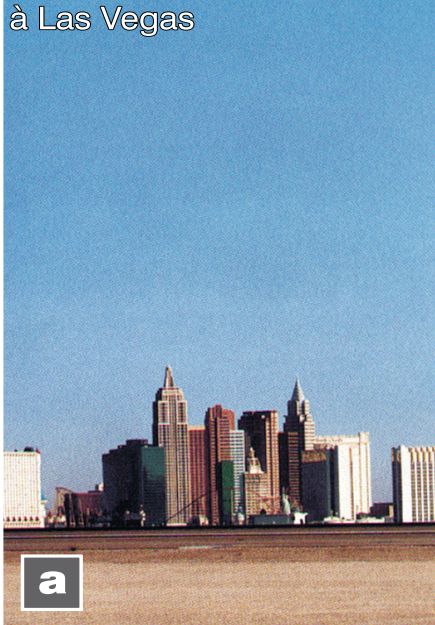
En conclusion, les lieux possibles de notre habiter quotidien changent de nature : interstices, entre-deux, marges, bords, etc., dans lesquels l'habitant n'existe qu'en référence aux vrais lieux (le centre-ville, etc.) : notre existence, nos activités sont réglées par l'ailleurs et nous obligent à de continus déplacements. Nous sommes devenus des **sédentaires en exil**... Si la ville suburbaine n'est pas considérée comme la ville elle-même, mais elle n'est pas la non-ville (la "campagne") pour autant : il s'agit véritablement d'un **entre-deux**. Entre le centre dont on se sent plus ou moins proche (le véritable cœur où ça se passe) et le lointain (la nature préservée), l'habitant reste écartelé. C'est pourquoi le grand public reste aujourd'hui fasciné par l'attrait du pavillon (ill. f) conjugué à celui du véhicule tous-terrains : être seul chez soi face à la nature, moyennant un moyen de déplacement qui les reliera tant à la ville qu'à la nature la plus inaccessible...

1 Relire à cet égard le roman de Georges Perec, *La vie mode d'emploi*, qui décrit les occupants d'un immeuble parisien.

2 Voir à cet égard l'incroyable apologie du *shopping* dans *Mutations*, Rem Koolhaas, Actar 2000.

HABITER NULLE PART

Little New York
à Las Vegas



L'espace moderne
automobile



Ségrégations
horizontales



Non-lieux et
bords urbains



L'espace consumériste
du centre commercial



Le mythe du pavillon
et de l'automobile

NON-LIEUX, ENTRE-DEUX, PÉRIPHÉRIES

Illustrations tirées de Mutations - Actar - 2000.

Habiter des lieux implique que l'homme habite autant le système global planétaire (les choses, les équilibres écologiques, notre dimension corporelle) que le système global humain (le fait social, le sens, le langage). Parler de **système**, c'est commencer à distinguer le local du global et penser l'articulation des éléments à l'ensemble.

Une propriété fondamentale des systèmes, c'est la notion de "**non-sommativité**"¹ : les propriétés d'un système ne se réduisent pas à la somme des propriétés de ses éléments. L'association particulière de certains éléments produit une **qualité** nouvelle. C'est ce qu'on appelle le **saut qualitatif**. Dans la nature, tels sauts qualitatifs jalonnent la complexification de la matière : entre minéral et l'organique, il y a la brusque apparition de la vie par la constitution des acides aminés, complexes organiques dont les propriétés sont radicalement autres que celles de ses composants chimiques (C, O, H) ; entre le règne animal et l'humanité, il y a l'apparition du sens, etc.

Cette complexification par sauts qualitatifs fonctionne sur le mode de l'empilement, de la **capitalisation** : la strate humaine (le sens) repose sur la strate animale (la vie mobile), qui repose sur la strate organique (la vie), qui repose sur la strate minérale (l'existence), qui repose sur la physique des atomes, etc. Il s'agit d'une construction d'ensemble où la strate plus complexe s'ajoute aux strates inférieures sans se substituer à elles. Au contraire, la strate supérieure n'existerait pas sans les strates inférieures. Très brièvement, la prétention de certains à vouloir un substitut technologique de la nature², est littéralement contre nature et a pour effet de priver l'habiter humain de son propre fondement (sans doute est-ce en fait l'objectif poursuivi).

Ces sauts qualitatifs sont ce que les architectes appellent des sauts **d'échelle**. Philippe Boudon suggère que la notion d'échelle est une passerelle³ qui permet la communication entre la pensée abstraite et la pensée concrète, entre la valeur et la quantité. *L'échelle permet de situer les domaines de valeurs propres aux quantités*. Contrairement aux quantités, qui évoluent analogiquement (elles s'additionnent), les faits de sens sont de nature discrète (ils se distinguent par oppositions). Par exemple, si on peut peser ensemble des pommes et des poires (opération sur la masse), on ne peut les additionner car elles appartiennent à des catégories différentes (opération sur la qualité).

Tous les faits humains lient le **quantitatif** au **qualitatif**. De même que faire face à la crise écologique déborde la gestion des polluants (quantités) et fait retour sur nos modes de vie (qualités), l'architecture durable concilie le projet comme construction (l'objet-enveloppe comme quantité) et le projet comme habiter (l'objet comme appropriation qualitative), deux versants sont indispensables au sein de l'écoumène⁴. L'échelle lie la quantité (décompte, mesure, proportion) à la qualité (propriétés, relations que les choses ont entre elles) : les membres d'une même famille ont entre eux des relations spécifiques qui font d'eux, précisément, une famille ; les pièces d'une habitation ont entre elles des relations qui les déterminent, précisément, comme une habitation, etc.

Grâce au concept d'échelle, **l'être humain organise le monde concret en catégories logiques** (liées concrètement à une certaine dimension de notre matérialité humaine et terrestre) et rassemble ainsi les objets qui appartiennent "à la même échelle". L'échelle est donc une lecture concrète du monde et se trouve au cœur de notre vision de la Terre (le "monde") comme dans notre construction sociale (la personne, le couple, la famille, le clan, la nation, l'humanité...). La ville européenne paraît bien le plus extraordinaire exercice de matérialisation d'échelles. Socialement, l'unité de base (le "même" de la catégorie) est le membre du corps social (aujourd'hui, le citoyen) ; il organise matériellement et symboliquement son habiter par des pièces, qui forment des bâtiments individuels, ceux-ci formant des ensembles spécifiques (rues, avenues, quais, places) ayant des propriétés spécifiques (partage de l'espace, proximité, circulation, etc.), ceux formant des quartiers, des villes, des territoires, etc. Inversement, vers les échelles inférieures au bâtiment, on a les matériaux, la matière (avant sa transformation), la chimie, la physique, etc. Le principe de ce mode de constitution n'est guère différent de celui des acides aminés...

La particularité fondamentale de notre habiter, c'est qu'on habite **simultanément** toutes ces échelles. Matériellement, par exemple, l'eau nécessaire à l'équilibre du corps (boire, transpirer) fait toujours partie d'un bilan plus large (consommation d'une ville) lui-même inscrit dans un cycle global naturel régional voire mondial. De la même manière, l'évolution de l'humanité nous a fait prendre conscience qu'on n'est pas homme sans avoir pleinement conscience de notre appartenance à l'humanité (Déclaration des droits de l'homme), qui dépasse notre appartenance à la famille. **On est donc toujours à la fois dans le global et dans le local**. Concrètement, il existe plusieurs échelles simultanées de l'habiter, c'est pourquoi l'architecture est multi-scalaire. Chaque maison, par exemple, s'adresse à ses occupants particuliers (proportions et dispositions des pièces), mais aussi à l'espace public à l'échelle du voisinage et de la rue (mitoyenneté, façades, etc.), du quartier (gararits) ou de la ville (typologie), voire de la région (matériaux, style, relation au climat, etc.).

Inversement, la **modernité** a pour effet de détruire toutes les échelles intermédiaires entre le soi (unité de base, l'individu) et le tout (la planète, ou le marché), c'est-à-dire qu'elle tend à faire disparaître les logiques de relation entre les choses et la notion même d'échelle (telle qu'elle s'est articulée au fil des siècles et des cultures dans les sociétés humaines) pour que les systèmes humains s'ajustent à un schéma purement binaire (la chose pensante et la chose étendue, l'homme face à la nature, le consommateur face au marchand, etc.).

Concevoir une architecture durable, c'est concevoir l'architecture en **s'inscrivant** dans cette articulation complexe de sauts d'échelle touchant à la fois la matière concrète et la matière symbolique ; c'est identifier comment les éléments de l'architecture **s'associent** pour former des éléments d'échelle supérieure ; c'est viser par les moyens de l'architecture au **prolongement** des collectifs existants (la rue, la ville, etc., mais aussi : l'air pur, l'eau propre, l'environnement). Architecturer, c'est **prendre part**.


1. Voir notamment la théorie générale des systèmes (L. von Bertalanffy, 1973).

2. Voir, par exemple, l'apologie des conditions technologiques du *shopping*, dans *Mutations*, Actar, 2000.

3. Originellement, l'échelle est *eskala*, la passerelle permettant de quitter le bateau pour monter sur le quai.

4. Dans la pratique, l'architecte risque à tout moment de verser soit dans la réduction à la chose pure (l'espace indicible, la pure rentabilité) soit dans la réduction au langage pur (la mode, le formalisme, le fonctionnalisme).

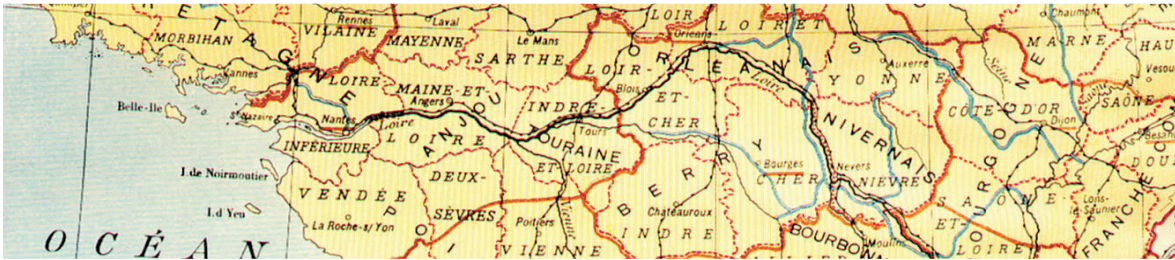
planète



LES ÉCHELLES DE L'HABITER


humanité

territoire



peuple

ville




clan

quartier



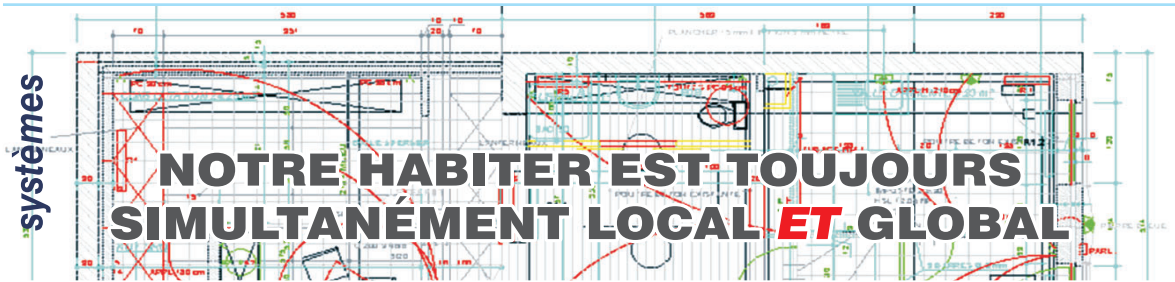
famille

maison



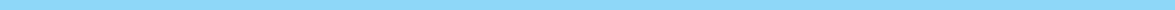
couple

rooms



soi

matériaux



**NOTRE HABITER EST TOUJOURS
SIMULTANÉMENT LOCAL ET GLOBAL**

cellule

De la pièce, au territoire et à la planète.

Bien que de nombreux aspects soient de plus en plus réglementés, le management environnemental s'appuie avant tout sur une initiative volontaire de maîtres d'ouvrage publics ou privés.

Cette démarche devient de plus en plus une réalité et de nombreux exemples européens le prouvent :

- en France : des logements sociaux à Verberie ;
- en Suisse : l'Office Fédérale de la Statistique à Neuchâtel ;
- aux Pays-Bas : l'immeuble de bureaux "Tax Office" ;
- en Irlande : le "Letterkeny Institute of Technology" ;
- en Angleterre : la maison Hockerton ;
- en Grèce : le Melititiki Office ;
- en Autriche : les maisons Sagedergasse ;
- et aussi en Suède, en Norvège...

Selon les pays, ces initiatives prennent naissance de manière différente. Au Benelux, ce sont essentiellement les maîtres d'ouvrage privés (particuliers, banques, assureurs...) qui ont lancés les premières opérations de ce type. En France, par contre, les maîtres d'ouvrage publics restent aujourd'hui encore les principaux acteurs de cette démarche. Avec le soutien de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et de plusieurs conseils régionaux, des opérations significatives se sont multipliées depuis deux ans. Les organismes de logements sociaux ont également largement appuyé cette démarche qui correspond parfaitement aux missions qu'ils mènent déjà depuis longtemps : maîtrise des coûts et réflexion en coût global, intégration sociale des personnes défavorisées, réduction des dépenses énergétiques...

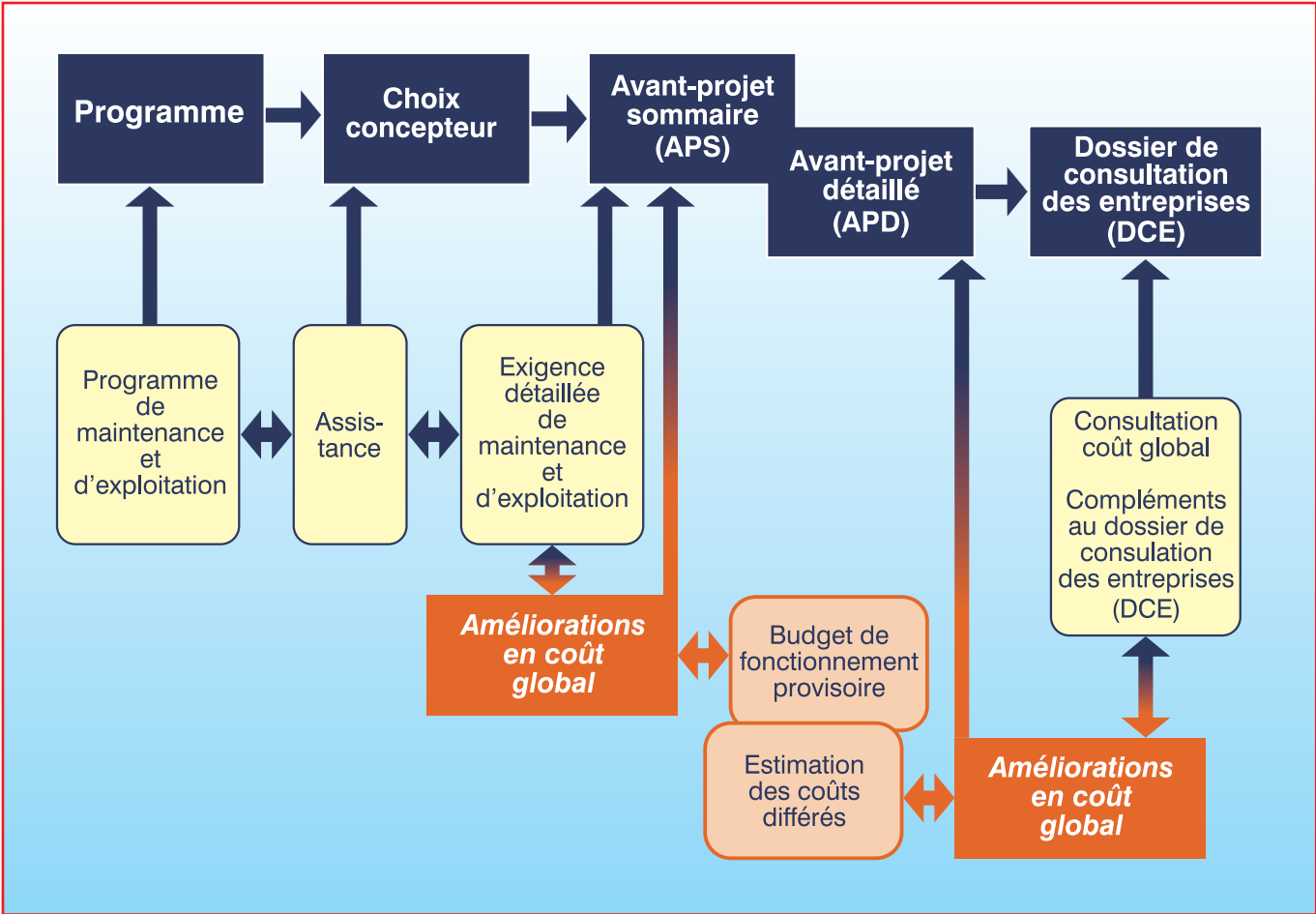
Toutefois, cette démarche de management environnemental des opérations de construction et de réhabilitation doit trouver son intérêt dans sa viabilité économique. Cette réalité économique est le passage obligé pour convaincre élus et services publics. Une approche en coût global (coût global = coût d'investissement + coût d'exploitation + coût d'entretien et de maintenance) s'impose donc généralement pour aborder une telle opération et effectuer des choix équilibrés sur le plan économique et environnemental. Certains coûts tels que les coûts sociaux ne peuvent pas cependant être directement pris en compte dans les calculs et restent externalisés. L'intérêt de valoriser ces opérations en Europe dépasse donc largement le seul champ du bâtiment.

Plus qu'une opération de construction ou de réhabilitation, une telle démarche exprime plus globalement les choix de société que nous souhaitons pour demain : améliorer le cadre de vie, utiliser des énergies renouvelables et non polluantes, respirer un air de qualité, favoriser les échanges sociaux, assurer le développement économique local, favoriser un commerce équitable...

Le management environnemental des opérations de construction ou de réhabilitation reste avant tout une démarche volontaire.

Phases	Dépenses réelles engagées	Part du coût global engagée
Opportunité, faisabilité, programmation du bâtiment	2 %	70 %
Conception APS, APD, DCE	5 %	90 %
Réalisation des travaux	75 %	95 %
Réception	90 %	98 %
Mise en exploitation	100 %	100 %

Ordres de grandeur des engagements **1** selon l'avancement du projet.



2 L'intérêt de la prise en compte des coûts différés.

Les premiers retours d'expériences d'opérations HQE démontrent que les difficultés auxquelles nous sommes confrontés sont moins d'ordre technique que de management de projet. Il semble apparaître que la démarche HQE bouscule les habitudes de travail prises par la maîtrise d'œuvre et la maîtrise d'ouvrage ces trente dernières années.

Elle remet tout d'abord en question le rôle de l'architecte au sein de l'équipe de conception et souhaite réaffirmer sa mission de "project manager" qui a pu parfois être délaissée ou minimisée. Il est vrai que ce sujet ne fait pas, ou trop rarement, partie des sujets abordés lors de la formation initiale proposée dans les écoles d'architecture européennes. Ce manque a fait émerger en Angleterre un nouvel intervenant : le project manager. Le management environnemental des opérations HQE a largement favorisé l'intervention de spécialistes en thermique, en acoustique, en médecine du travail, en sociologie, en construction bois... Il a accru considérablement le nombre d'intervenants au sein de la maîtrise d'œuvre. Un travail de coordination apparaît nécessaire et s'impose de fait pour éviter un "collage" projectuel des décisions prises par chacun sans prise en considération de la globalité du projet. Si le besoin se fait effectivement ressentir, nous ne savons pas encore aujourd'hui comment le secteur du bâtiment y répondra et si l'expérience anglo-saxonne sera reproduite dans le reste de l'Europe. Le débat est ouvert ...

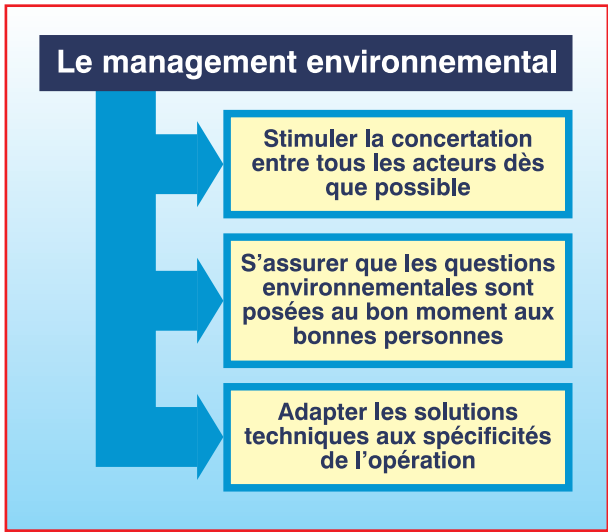
Les entreprises et les industries de la construction sont également confrontées aux mêmes questions et cherchent à s'adapter aux nouvelles exigences de "construction durable". La Fédération des Industries Européenne de la Construction (FIEC) a ainsi établi une charte allant dans ce sens. Les fédérations du bâtiment se mobilisent également pour fournir des outils et des recommandations sur la gestion des déchets de construction et de démolition ainsi que sur le management environnemental des opérations de chantier. Sur chantier, les entreprises font également appel à des intervenants spécialisés dans de nouveaux domaines : valorisation des déchets de chantier, gestion des risques de pollutions des eaux, du sol ou de l'air...

Compte tenu de la complexité momentanée et de la profusion de nouvelles réglementations visant la protection de l'environnement, l'intervention de spécialistes de disciplines différentes (sociologues, médecins, psychologues, urbanistes, thermiciens, acousticiens, éclairagistes, physiciens du bâtiment, chimistes, experts en maintenance, en déchets de chantier et déconstruction sélective...) permet actuellement à la maîtrise d'œuvre d'aborder les questions posées par les maîtres d'œuvre, ou la société d'une manière générale. Cette période peut être transitoire, le temps que les maîtres d'œuvre puissent se former et acquérir les compétences qui leurs sont demandées. Mais, il se peut aussi que cette situation soit en fait un signal et nous contraindra à concevoir différemment le travail des maîtres d'œuvre d'aujourd'hui.

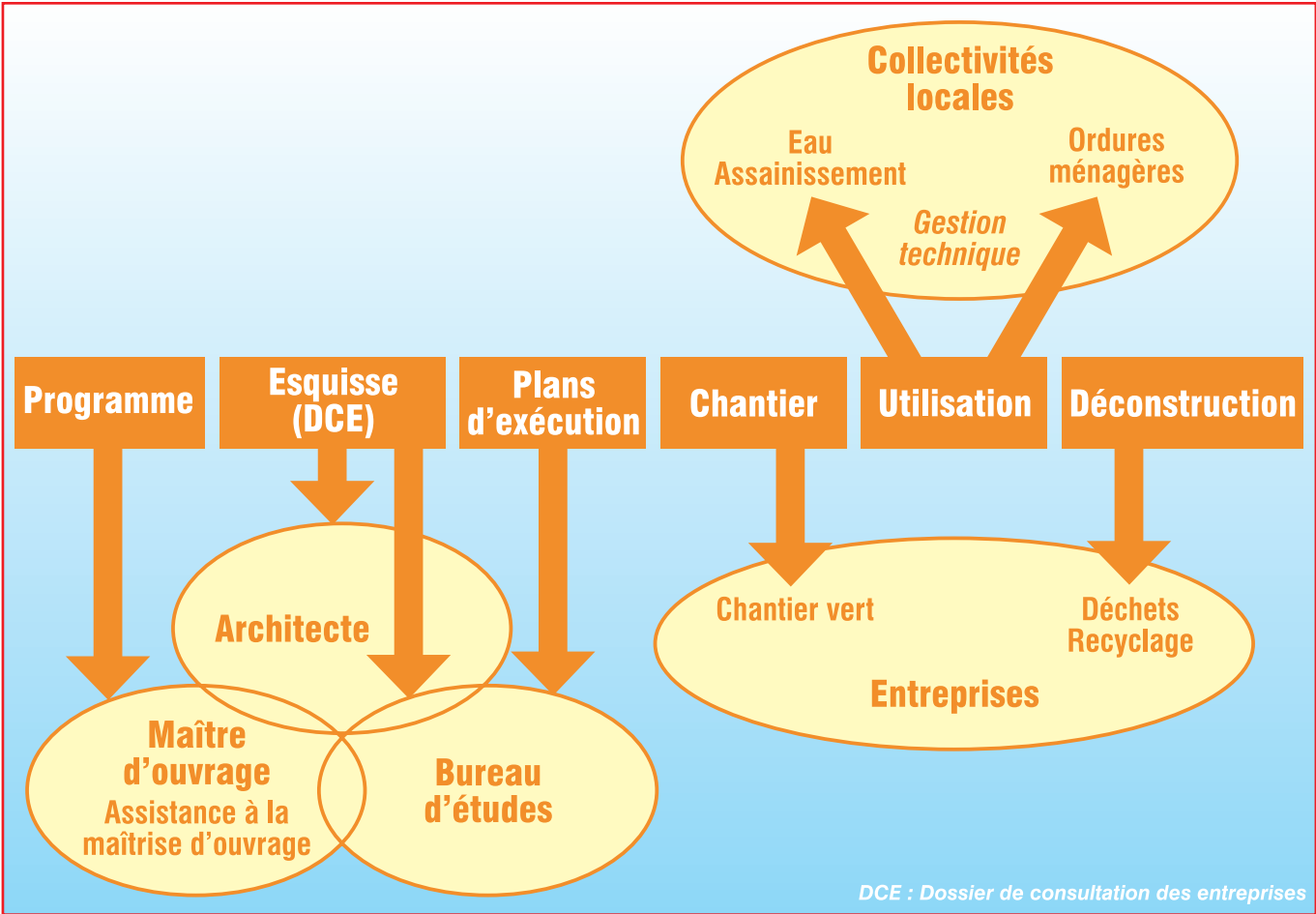
Si l'intervention d'acteurs de disciplines différentes a montré de nombreux intérêts pour la conception d'opérations HQE, elle est également à l'origine des échecs de certains projets. Le retour d'expériences, que nous collectons au fur et à mesure dans les différents pays européens, devraient nous permettre d'établir dans les années à venir des stratégies plus opérationnelles pour les phases de conception et de chantier.

Pour pérenniser le management environnemental des opérations HQE et recueillir les informations quant aux clés de succès et aux sources d'échecs, il convient à l'heure actuelle de favoriser, comme l'ont déjà suggéré les ministres français au Logement et à l'Environnement, la création d'observatoires dont l'une des missions consisterait notamment à uniformiser les modalités de suivi des opérations HQE, de les collecter pour définir les stratégies de conception pour les maîtres d'œuvre, de construction pour les entreprises, de gestion pour les occupants, d'entretien et de maintenance...

Le management environnemental des opérations requiert la collaboration et la coordination d'acteurs multidisciplinaires au sein de la maîtrise d'œuvre.



Le management environnemental. **1**



2 Les différents acteurs et le cycle de vie du bâtiment.

Les opérations HQE menées jusqu'à présent ont permis de souligner l'importance du management environnemental. Chaque aspect de cette démarche demande que :

- des responsabilités soient prises à toutes les phases de l'opération (programmation, conception, réalisation, exploitation) ;
- des procédures soient appliquées pour assurer la transparence des décisions prises ;
- un suivi des réglementations en vigueur soit opéré ;
- une évaluation continue du projet soit réalisée.

Le Système de Management Environnemental (SME) d'une opération se caractérise par un ensemble de procédures et de pratiques, spécifiques à chaque opération, élaboré, mis en place et géré par le maître d'ouvrage pour définir, mettre en œuvre, contrôler et évaluer l'opération.

Six principes ont pu être définis pour mettre en place un Système de Management Environnemental :

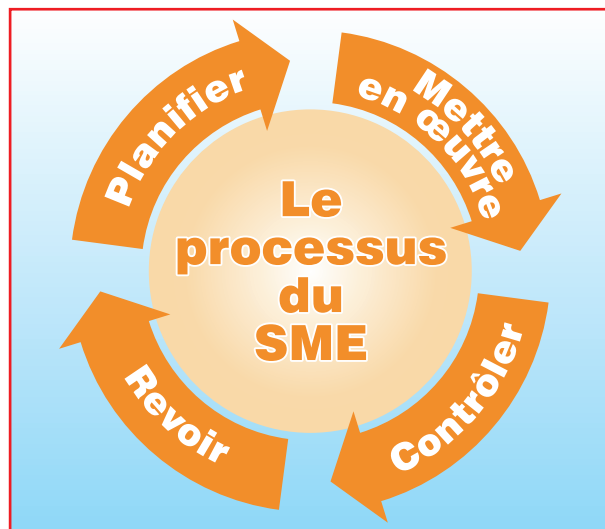
- le maître d'ouvrage doit définir un exigentiel environnemental pour l'opération ;
- le maître d'ouvrage doit organiser la mise en œuvre de l'exigentiel environnemental et évaluer l'état final de l'opération ;
- le maître d'ouvrage doit contrôler la mise en œuvre de l'exigentiel environnemental et évaluer l'état final de l'opération ;
- chaque fournisseur direct du maître d'ouvrage doit désigner un responsable de la qualité environnementale pour l'opération ;
- chaque fournisseur direct du maître d'ouvrage doit tenir une documentation de la qualité environnementale de sa prestation ;
- chaque fournisseur indirect du maître d'ouvrage doit pouvoir répondre aux demandes d'information des fournisseurs directs.

Toutefois, la formalisation méthodologique du SME n'est pas actuellement complètement aboutie. La démarche HQE est innovante et demande encore de la part de chaque intervenant de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre la maîtrise de ce travail d'expérimentation.

En ce qui concerne les procédures qui seront mises en place, elles doivent être les plus simples possibles d'utilisation pour que chaque intervenant soit responsabilisé et prépare, organise, évalue et capitalise les prestations fournies. Ces procédures, transcrites sous la forme d'exigentiels environnementaux "opérationnels", seront adaptées au contexte de l'opération et seront basées sur la norme ISO 14001.

La maîtrise du Système de Management Environnemental devrait nous conduire à réaliser une documentation complète de l'opération. Cette documentation constituera un "registre environnemental de l'opération" retraçant l'historique des décisions prises par rapport à l'exigentiel environnemental initial, les exigentiels environnementaux opérationnels, les informations technico-économiques concernant l'opération, les notices des différents fournisseurs, les différents travaux d'évaluations effectués par rapport aux exigentiels de l'opération.

Le Système de Management Environnemental (SME) se caractérise par un ensemble de procédures et de pratiques élaboré, mis en place et géré par le maître d'ouvrage pour définir, mettre en œuvre, contrôler et évaluer l'opération. Le programme est le premier document clé du SME.



Les principes de la démarche qualité. 1

Politique environnementale

Planification

- ☞ Aspects environnementaux
- ☞ Exigences légales et autres exigences
- ☞ Objectifs et cibles
- ☞ Programme(s) de management environnemental

Revue de direction

- ☞ Amélioration continue
- ☞ Pertinence et efficacité des cibles atteintes
- ☞ Évaluation du système à intervalles définis
- ☞ Recollement des objectifs et des procédures

Mise en œuvre et fonctionnement

- ☞ Structures et responsabilités
- ☞ Formation, sensibilisation et compétence
- ☞ Communication
- ☞ Documentation
- ☞ Maîtrise de la documentation
- ☞ Maîtrise opérationnelle
- ☞ Prévention des situations d'urgence et capacité à réagir

Contrôle et action corrective

- ☞ Surveillance et mesurage
- ☞ Non-conformité, action corrective et action préventive
- ☞ Enregistrements
- ☞ Audit

2 Structure de la norme ISO 14001.

L'Agenda 21 adopté lors de la conférence de Rio a souligné l'importance d'un processus participatif et souhaite « Renforcer le rôle des différents acteurs de la société ».

Le management environnemental va également dans ce sens et rappelle qu'il convient de fédérer l'ensemble des acteurs. C'est une démarche avant tout volontaire qui demande la participation active de chaque intervenant : architectes, ingénieurs, entrepreneurs...

Rappelons que certains architectes en réaction aux idées "rationalistes" de la société industrielle, ont déjà proposés dès les années soixante-dix plusieurs tentatives dites "participationnistes" pour favoriser un échange créatif entre ceux qui conçoivent, gèrent le bâtiment et ceux qui vont réellement y vivre. Si ces expériences restèrent marginales, souvent mal maîtrisées, les nombreuses expériences européennes, comme par exemple à Vauréal (F), à Liège (B) ou à Yverdon-les-Bains (CH), montrent toute la difficulté et tout l'intérêt d'associer dès la conception les personnes concernées pour créer de nouvelles dynamiques sociales et une revalorisation de l'environnement urbain.

La démarche HQE repose cette question comme l'un des principaux enjeux du processus de conception et de construction. Elle demande que les préoccupations du maître d'ouvrage, des usagers et de la population riveraine soient prises en compte. Elle élargit le débat et propose non seulement d'organiser la participation avec les usagers mais aussi la concertation avec les publics cibles et toutes personnes intéressées par l'opération en question. Ces démarches de consultation et de participation devraient assurer une plus grande adhésion à la démarche globale de développement durable, une meilleure adaptation de l'opération aux modes de vie des habitants, une insertion urbaine plus harmonieuse, et donc permettre, à plus long terme, d'améliorer notre cadre de vie. Indirectement, elle permet une diffusion, une sensibilisation aux problématiques de développement durable.

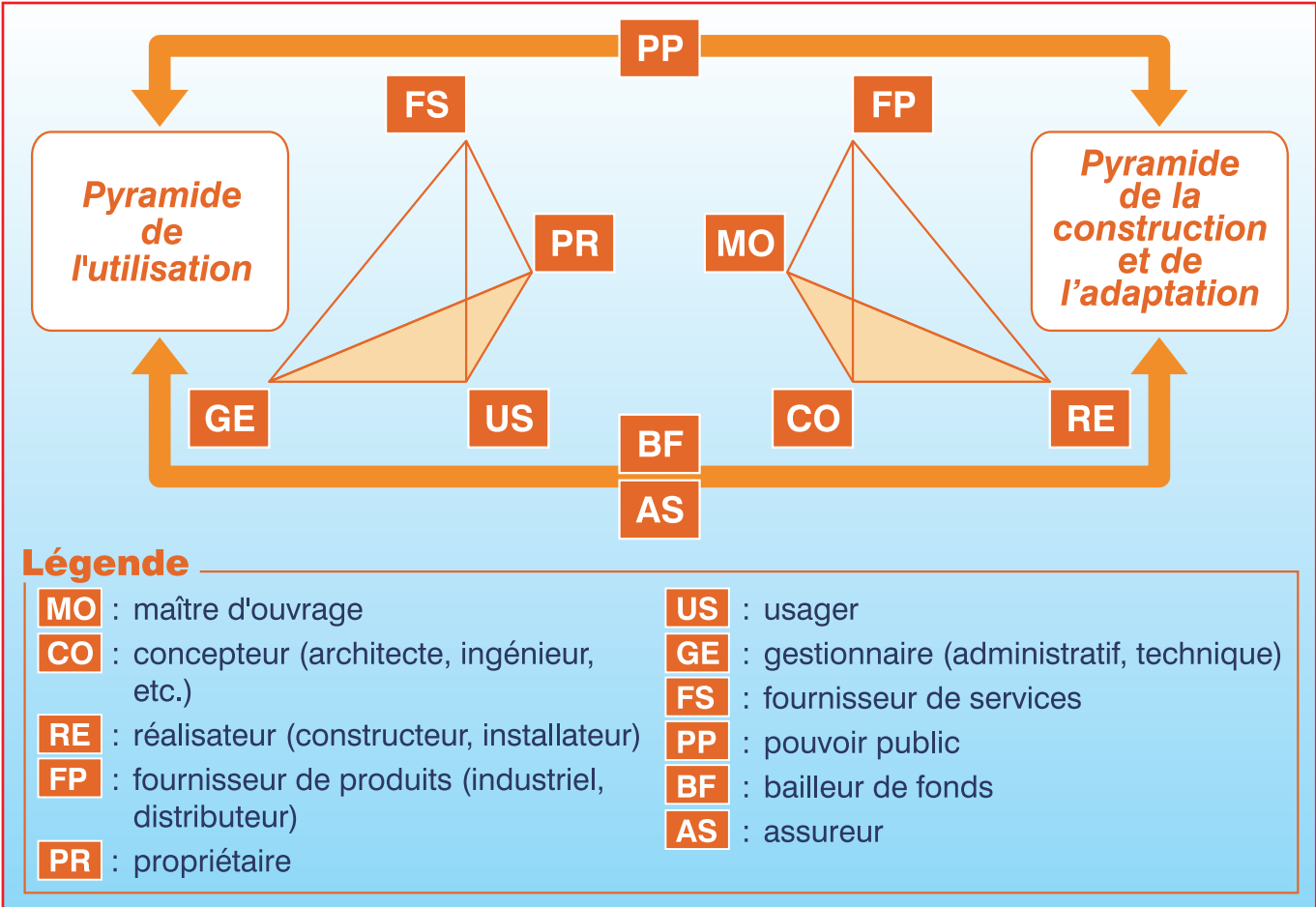
Vu l'intérêt démontré par les expériences passées, plusieurs méthodes furent mises au point pour structurer ce processus de consultation et de participation lors du processus de programmation et de conception. Ces méthodes demandent aujourd'hui d'être réactualisées au regard des nouvelles exigences, et développées pour d'autres phases.

Ainsi, en France, Michel Conan s'inspirant des travaux anglo-saxons élaborera une méthode appelée "Programmation Générative" qui fut appliquée dès 1989 dans le cadre du programme "Conception et Usage de l'Habitat". Cette méthode favorise les itérations entre les participants (usagers, concepteurs, décideurs...) en élaborant simultanément le programme et le projet. Le processus de conception devient alors un processus de négociation et de communication entre des acteurs "polymorphes" faisant évoluer le projet en considérant les diverses intentions, parfois conflictuelles, des différents intervenants. C'est le premier principe de la méthode de "Programmation Générative", comme nous le définit Michel Bonetti.

L'organisation de la participation et de la concertation entre les acteurs est l'une des clés de réussite d'une construction durable.



Logements sociaux HQE à Verberie **1**
(Architecte A. Cautris) (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).



2 Les pyramides d'activité du secteur du bâtiment (d'après l'Association HQE).

Les usagers sont au cœur de la démarche de management environnemental. C'est finalement à eux qu'incombera la responsabilité de trier ou non leurs déchets, de faire les efforts nécessaires pour réduire leurs consommations de chauffage ou électriques, de maîtriser leurs consommations d'eau... Le rôle des concepteurs se limite en fait à organiser et à faciliter leurs actions quotidiennes en faveur de l'environnement.

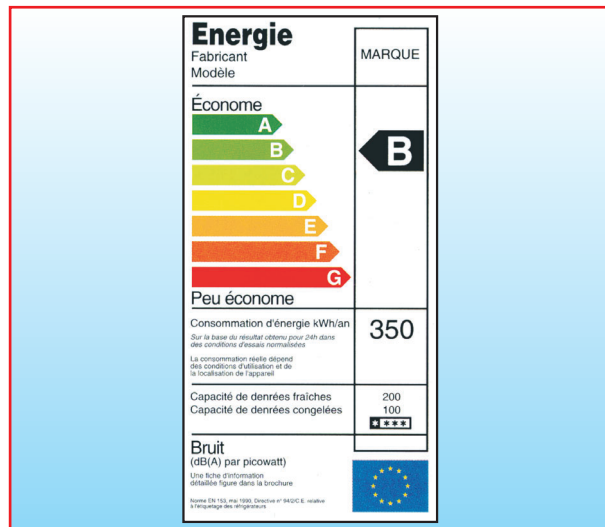
Ce qui est aujourd'hui mis en cause, ce sont effectivement nos comportements quotidiens :

- respectez les températures de confort : tout degré supplémentaire au-delà de 19°C représente une augmentation de 7 % de la facture énergétique ;
- pensez à diminuer le thermostat d'ambiance de 3 à 4°C lorsque vous partez plus de 2 heures et de le mettre en "hors-gel" si vous partez de chez vous plusieurs jours ;
- pensez à la régulation : la pose d'un programmeur et d'un thermostat d'ambiance permet d'adapter la consommation de chauffage aux besoins réels ;
- faites des entretiens réguliers et remplissez un carnet d'entretien de votre bâtiment : contrôle de la chaudière et du chauffe-eau, dépoussiérez les radiateurs et vos grilles de ventilation, remplacez le filtre de la ventilation mécanique, nettoyez votre fosse septique, vérifiez vos chasses d'eau, nettoyez votre local à déchets... ;
- évitez l'utilisation de chauffages d'appoint individuels ;
- isolez votre bâtiment, surtout la nuit en fermant vos rideaux et volets ;
- réglez la température du chauffe-eau à 55°C au maximum ;
- coupez la veilleuse du chauffe-eau au gaz en cas d'absence prolongée ;
- pensez à ne pas mettre le frigo à côté d'une source de chaleur ;
- dégivrez régulièrement : 4 centimètres de givre doublent la consommation ;
- évitez de décongeler les aliments au micro-ondes ;
- ne pas mettre des plats chauds dans le réfrigérateur ;
- pensez à acheter des lampes basse consommation : elles permettent de diviser par 4 les dépenses d'éclairage ;
- éteignez la lumière lorsque vous quittez une pièce ;
- évitez les veilles des appareils électriques : jusqu'à 500 kWh/an d'économies potentielles pour le seul poste audio-visuel ;
- fermez votre compteur d'eau lorsque vous partez en vacances ;
- pensez à effectuer un suivi de vos consommations et de vos dépenses d'entretien ou de maintenance.

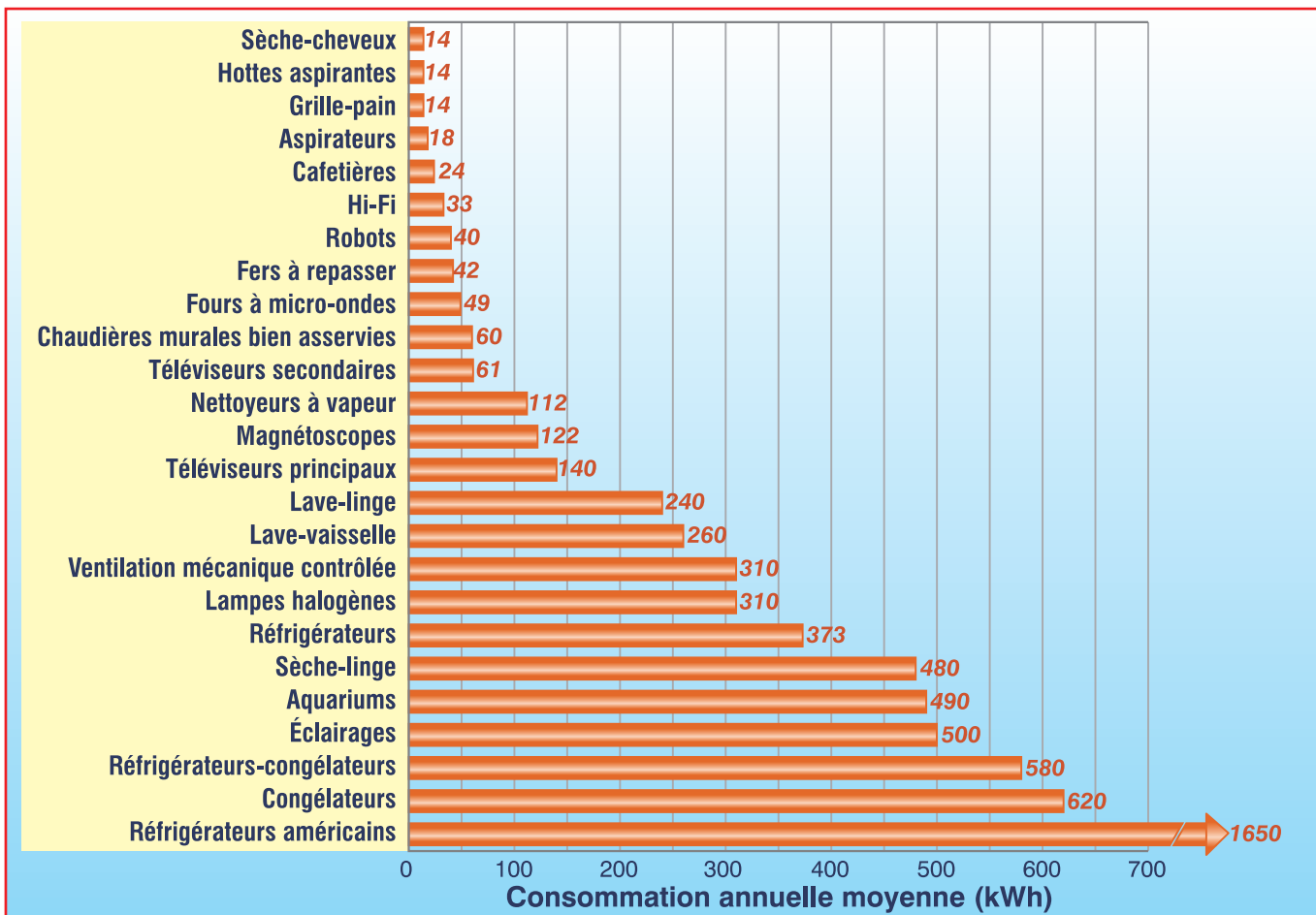
Outre le chauffage et les frais d'entretien qui restent les postes les plus importants des factures de logement, le nombre croissant d'appareils électriques a largement fait augmenter ce poste ces dernières années. À titre d'exemple, selon une étude menée en France dans plusieurs logements, il faut savoir que la consommation annuelle d'une cafetière électrique représente plus de 3 euros, d'une télévision avec un magnétoscope environ 26 euros. Nous payons également chaque année plus de 48 euros pour nous éclairer. Le poste le plus important concerne les appareils de froid : frigos et congélateurs. Les réfrigérateurs et congélateurs pèsent plus de 30 % de la consommation électrique des logements. La consommation électrique d'un congélateur dépasse en effet les 65 euros par an ! Pour aider les consommateurs à optimiser leurs choix, une "étiquette énergie" est apposée en Europe sur les lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, frigos et congélateurs. C'est la carte d'identité énergétique de l'appareil. Il existe également une étiquette du même type pour les ampoules d'éclairage. Cette "étiquette énergie" classe la consommation des appareils selon un repère coloré, de la catégorie A la moins énergivore à la catégorie G la plus consommatrice.

Ces "petits" gestes quotidiens sont loin d'être sans importance. Au contraire, ils contribuent réellement au respect de notre environnement local, régional et planétaire.

Par nos comportements, chacun d'entre nous peut jouer un rôle essentiel pour réduire les consommations d'énergie ou d'eau, et contribuer ainsi à préserver l'environnement.



L'étiquette énergie (EDF/ADEME). 1



2 La consommation annuelle des appareils électriques (ADEME).

Au cours des trente dernières années, si des efforts significatifs ont progressivement été réalisés pour réduire la consommation énergétique des habitations, aujourd'hui, la part liée aux transports quotidiens est devenue de plus en plus prépondérante (figure 2) atteignant largement plus du tiers de la consommation d'énergies des ménages.

Avant même que l'architecte n'intervienne pour concevoir le futur bâtiment, le maître d'ouvrage aura donc déjà prédéterminé par le choix du site la majeure partie des impacts environnementaux que produira le bâtiment. Il convient dès les premiers repérages et avant d'arrêter la localisation définitive de la construction de prendre en compte les opportunités offertes par l'environnement proche :

- proximité par rapport au lieu de travail, à l'école, aux commerces... ;
- possibilité de raccordement aux réseaux urbains (égouts publics, eau potable, électricité, gaz, télécommunication...) ;
- facilité d'accès aux transports en commun (figure 1).

L'importance de ce choix doit être clairement soulignée puisqu'il pose de réelles questions en terme de développement durable de l'habitat et qu'il détermine au-delà du seul bâtiment projeté la consommation de carburants pour les transports quotidiens, les réseaux et voiries à tirer et à entretenir, l'imperméabilisation des sols, l'emprise humaine sur les espaces naturels... À titre d'exemple, il faut savoir que l'optimisation de ce choix permet à lui seul de limiter de manière non négligeable les émissions de gaz à effet de serre tout en réduisant rapidement la consommation énergétique globale de 30 à 60 kWh/m².an (m²SHON - m² Surfaces Hors Oeuvre Nette). Si le choix de la localisation du lieu de construction ne fait généralement pas partie du travail actuel des architectes, elle souligne par contre la responsabilité du maître d'ouvrage.

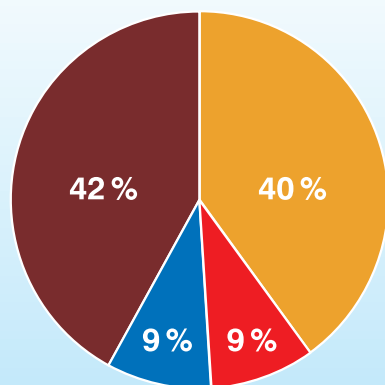
Avec l'augmentation continue du trafic, le thème des transports est devenu l'une des priorités majeures des politiques environnementales puisqu'ils sont directement responsables de nombreuses nuisances et pollutions urbaines. Toutefois, au-delà d'un simple comptage kilométrique qui conduirait à combiner densification de l'habitat et mixité des activités, la maîtrise des transports doit passer par une planification globale de l'aménagement du territoire qui devrait permettre un développement harmonieux de l'habitat et des activités humaines, que ce soit en milieu urbain ou en milieu rural.

La localisation du futur bâtiment prédétermine ses impacts sur l'environnement. Le maître d'ouvrage doit lors de ce choix prendre en considération les potentialités du site : proximité du lieu de travail, de l'école ou des commerces, raccordement aux réseaux urbains, accessibilité aux transports en commun.

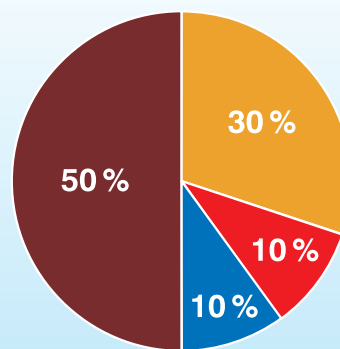


Embouteillages sur le périphérique. **1**

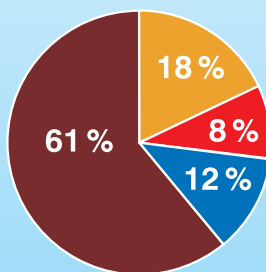
Construction à usage d'habitation



Consommations moyennes
314 kWh/m²



Consommations réglementaires
250 kWh/m²



Faibles besoins énergétiques
138 kWh/m²

- Chauffage
- Eau chaude
- Électricité
- Carburant

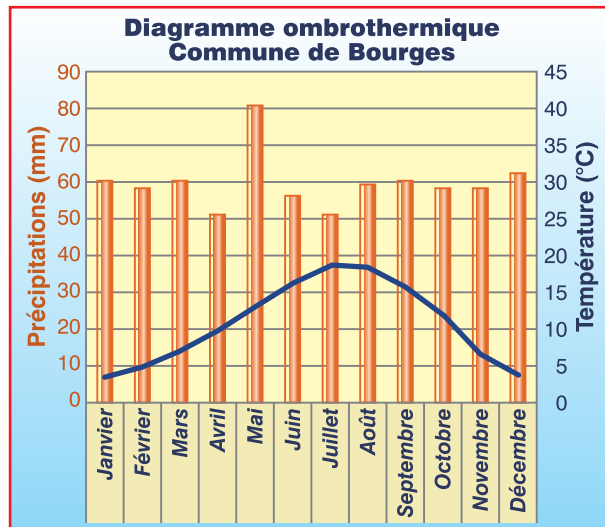
2 "Mobilité et habitat" (Énergie 2000).

La gestion des avantages et contraintes de la parcelle passe par une connaissance approfondie du site et de son environnement local, régional et global. Ainsi, les études préalables sont essentielles. Elles permettent d'établir un diagnostic environnemental exhaustif qui comprend la collecte des informations suivantes :

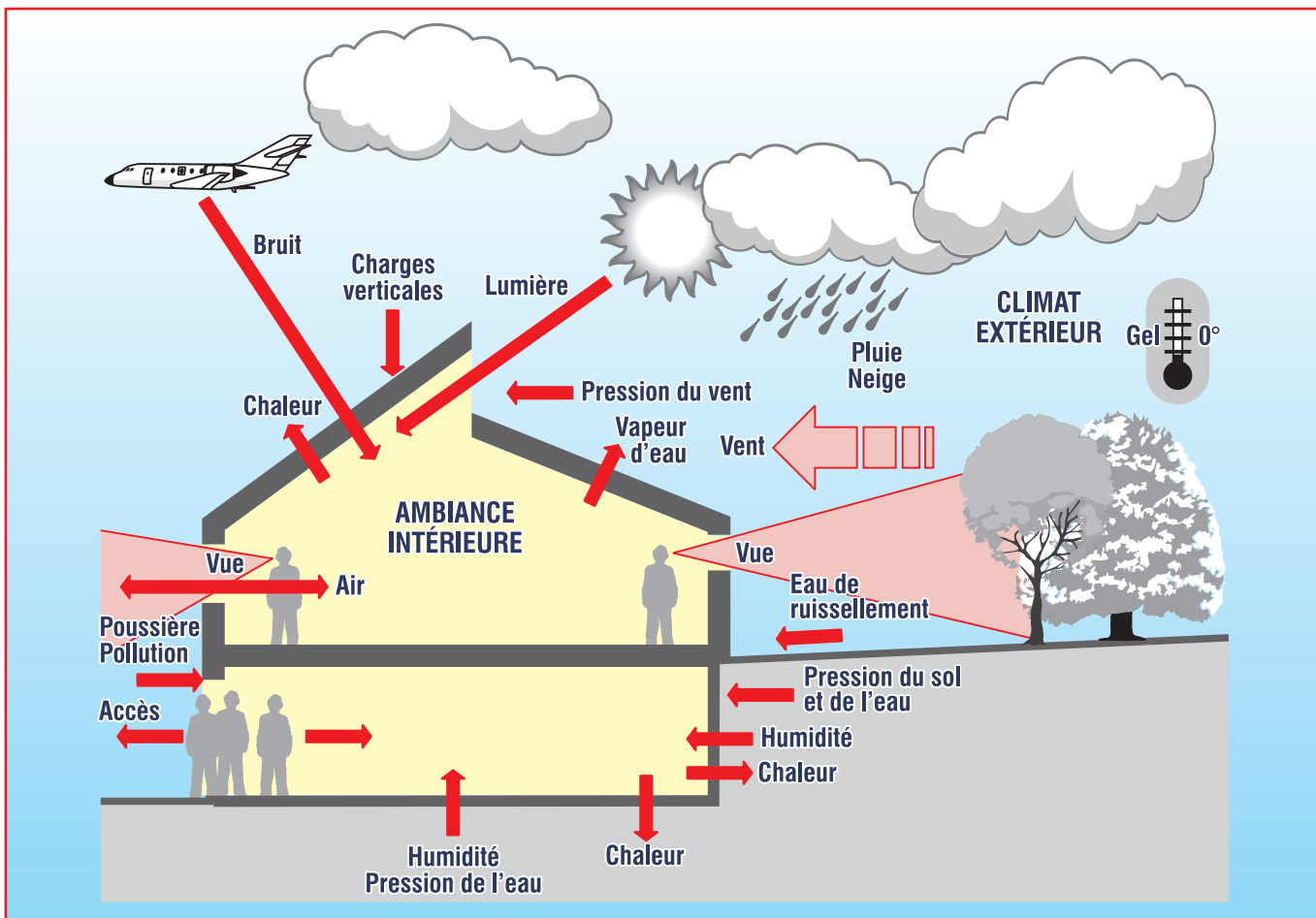
- caractéristiques physiques générales :
 - informations géographiques (latitude, longitude, altitude, orientation...);
 - informations climatiques et micro-climatiques (ensoleillement, températures, humidité, pluviométrie, vitesses et directions des vents...);
 - informations urbaines (transports publics, places de stationnement, bruits et autres nuisances urbaines, modes de collecte des déchets ménagers, sources d'énergies disponibles...);
 - informations paysagères (végétation, faune et flore...).
- qualité du sol et du sous-sol :
 - informations géologiques et pédologiques ;
 - informations hydrologiques (position et hauteur de la nappe phréatique, nature et perméabilité des sols, écoulements de surface...);
 - informations bio-chimiques visant à détecter des pollutions éventuelles des eaux ou des sols (radon, métaux lourds...).
- qualité de l'air :
 - informations fournies par les mesures de qualité de l'air (SO₂, NO_x, poussières...);
 - informations sur les installations polluantes proches (industries, voies urbaines...).
- qualité de l'eau :
 - informations physico-chimiques et bactériologiques sur l'eau potable ;
 - informations sur le mode de traitement des eaux usées et des eaux pluviales.

L'ensemble de ces informations aide l'architecte à orienter ses choix conceptuels pour tirer avantage des intérêts de l'environnement, et prendre les mesures compensatoires nécessaires pour prémunir les futurs occupants de tous les risques environnementaux. Le renforcement des études préalables permet au secteur du bâtiment d'élargir à tous les types de projets le champ d'application de la directive européenne 97/11/CE du 3 mars 1997 relative à l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.

Une parfaite connaissance du site, de ses avantages et contraintes, permet d'intégrer dès les premières esquisses les conditions d'ensoleillement, le vent, le relief du terrain, la végétation environnante, la qualité du sol et du sous-sol, etc.



Exemples de données à collecter **1**
(Météofrance).



2 Les sollicitations de l'enveloppe (d'après F. Simon).

Dans une optique de développement durable, la première exigence porte sur l'insertion environnementale du projet dans son contexte. Elle concerne donc non seulement le bâtiment, mais aussi les espaces extérieurs proches qualifiant de manière globale l'opération en question. Elle devrait conduire à renforcer l'attention apportée par l'ensemble de l'équipe de maîtrise d'œuvre, architectes et ingénieurs compris, aux aménagements des espaces extérieurs sur la parcelle concernée, à l'intégration paysagère du bâtiment dans son environnement, et plus généralement aux interactions entre le futur bâtiment et son environnement proche.

Cette première cible concerne donc l'ensemble des partenaires de l'équipe de conception (pas seulement les paysagistes ou les architectes !). Pour favoriser des relations harmonieuses entre le bâtiment et son environnement, le diagnostic environnemental du site constitue l'une des premières étapes indispensables de la démarche, car il devrait permettre aux concepteurs d'effectuer en connaissance de cause leurs premiers choix conceptuels (implantation et orientation des volumes bâtis sur la parcelle), constructifs (sélection des principaux matériaux pour l'enveloppe ou la structure), ou techniques (choix d'énergies et du mode de chauffage). Ce diagnostic environnemental peut dans certains cas être élargi à des analyses environnementales de l'entité urbaine environnante (la rue, le quartier...) pour prendre en considération des problématiques locales liées aux déplacements, à la pollution de l'air, à l'évacuation des eaux pluviales...

Au-delà du bâtiment, pour la maîtrise d'œuvre, la conception paysagère des espaces extérieurs ou la création d'espaces de transition devraient permettre de gérer au mieux les contraintes liées au futur bâtiment ou à son environnement telles que :

- le climat local : le vent, la pluie, l'ensoleillement... ;
- les nuisances acoustiques provenant éventuellement du bâtiment (chaufferies, transformateurs, systèmes de ventilation, ...) ou de son environnement proche (circulation, activités industrielles...);
- les nuisances visuelles ;
- les nuisances de confort thermique dues aux ombres portées ou au surensoleillement de certains espaces.

Trop souvent négligé ou différé pour des raisons de coûts, l'aménagement paysager des espaces extérieurs est pourtant essentiel (figure 1). La végétation participe en effet directement à la qualité du cadre de vie :

- en favorisant la biodiversité des écosystèmes et la conservation des habitats naturels (figure 2) ainsi que de la faune et de la flore existante (directive européenne 92/43/CE du 21 mai 1992) ;
- en participant à la régulation climatique (ensoleillement et ombres portées, protection contre la pluie et le vent, humidification de l'air par l'évapotranspiration...) du bâtiment ;
- en contribuant à l'amélioration de la qualité de l'air (absorption du CO₂ et production d'oxygène, filtration des poussières...);
- en régulant le cycle de l'eau ;
- en créant éventuellement un écran acoustique affaiblissant la propagation des sons.

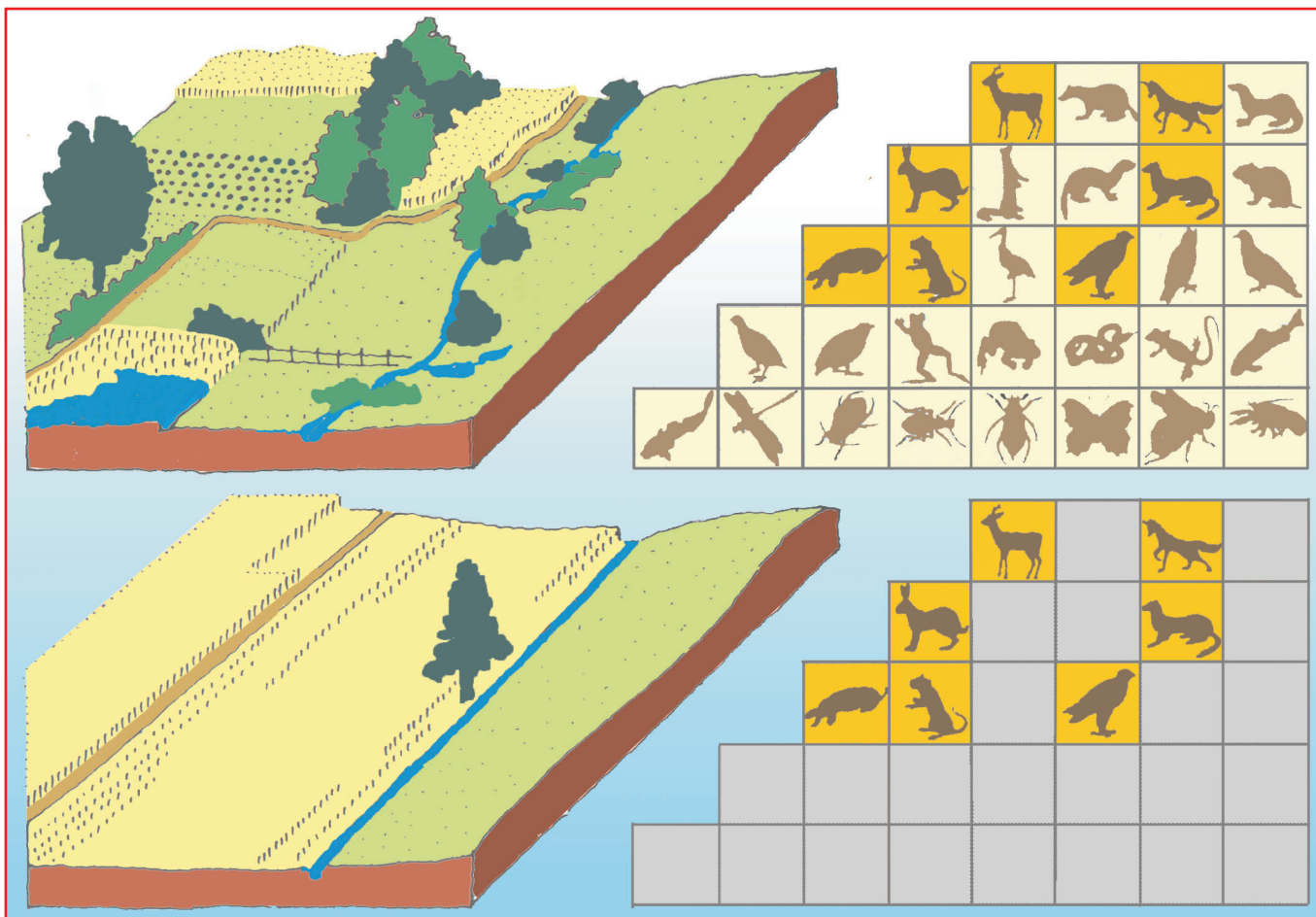
Les espaces verts contribuent également en milieu urbain à favoriser les échanges sociaux grâce aux activités qui peuvent y être organisées : aires de jeux ou de promenades... Plusieurs actions ont été entreprises par les villes européennes pour inverser la tendance actuelle et favoriser la végétalisation des lieux publics ou privés par la création de "corridors écologiques", de "trames vertes", de "voies vertes", de "ceintures vertes", ou par le verdissement des cours, jardins et cœurs d'îlots...

L'aménagement paysager des espaces extérieurs vise notamment à maîtriser les ambiances microclimatiques de l'environnement proche, pour assurer une qualité accrue au cadre de vie, sans induire de nuisances pour les riverains. Pour les climats chauds, le soin apporté aux aménagements extérieurs est déterminant car il conditionne encore plus fortement l'insertion environnementale de l'opération.

La construction d'un bâtiment transforme l'environnement naturel et humain pré-existant. En assurant une qualité accrue du cadre de vie, les aménagements paysagers permettent de gérer les interactions entre le futur bâtiment et son environnement proche.



1 Aménagement d'un parcours aquatique et forestier entre les 9 bâtiments collectifs du Schafbrühl à Tübingen (Allemagne) (Architecte J. Eble).



2 Protection des espaces et des paysages naturels (d'après H.R. Preisig).

Depuis la maison de thé au Japon jusqu'au plan de la "maison Schröder" de Rietveld en 1924 à Utrecht ; du Weissenhofsiedlung de Mies van der Rohe en 1927 à Stuttgart jusqu'à "La Mémé" de Lucien Kroll en 1970 à Bruxelles ; en passant par les trames tridimensionnelles de Friedman, ou les utopies d'Archigram, rares sont les cas où la flexibilité réelle du bâtiment reste encore aujourd'hui d'actualité, même pour ces projets exemplaires ! Le manque d'information des locataires, la discontinuité de la gestion, une grande frilosité des propriétaires entravent souvent l'application des principes conçus et mis en œuvre dans le passé.

Pourtant, malgré les nombreux échecs des expériences passées, la flexibilité des bâtiments reste une priorité. Proposé encore et toujours par les architectes, le débat semble loin d'être clos. Au contraire, avec l'irrésistible émergence de la démarche HQE, cette thématique retrouve de nouveaux intérêts, et les motivations se diversifient :

- motivations d'ordre économique :
 - réduction des coûts de rénovation ou de transformation ;
 - éviter l'obsolescence en adaptant facilement le bâtiment et ses équipements aux besoins et goûts des usagers actuels et futurs.
- motivations d'ordre sociologique :
 - désir d'intervenir sur son propre lieu de vie par des processus d'auto-construction, d'auto-maintenance ou d'autogestion ;
 - modifications et rotations répétées au sein du milieu familial : divorce et famille mono-parentale, départ de plus en plus tardif des jeunes, déménagements successifs, nécessité de réaménager suite à un handicap physique... ;
 - simple désir de changement.
- motivations d'ordre environnemental :
 - réduction des gênes et de la production de déchets consécutifs aux travaux de rénovations, de transformations ou d'extensions ;
 - accroître la durée de vie du bâtiment, tout en conservant un bon niveau de qualité d'usage.

Néanmoins, en tant qu'action différée dans le temps, il reste difficile pour les architectes de prévoir les modifications que souhaiteront et qu'apporteront les occupants.

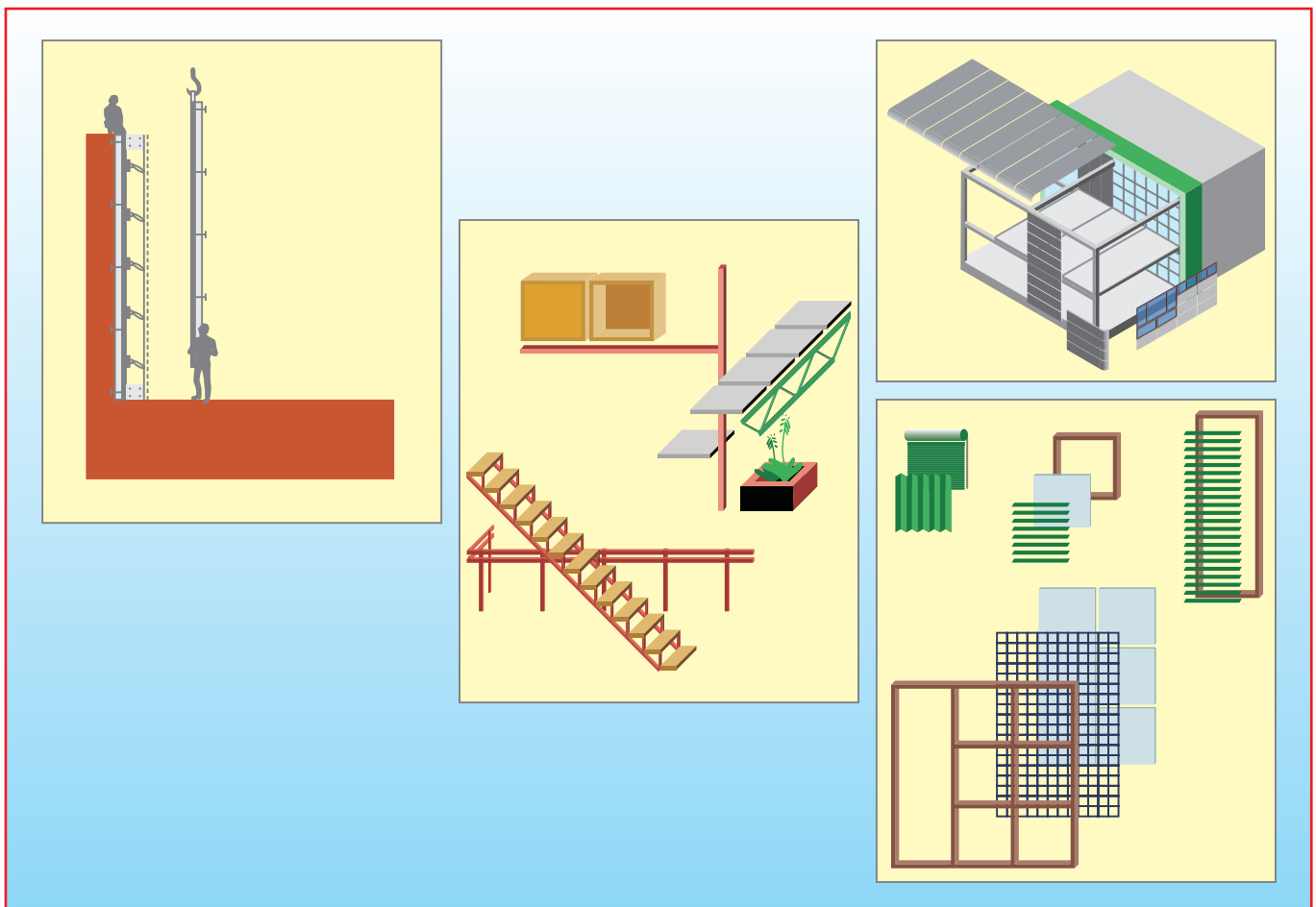
D'après des expériences passées et des travaux menés par N. Habraken et C. Alexander dans les années soixante, il apparaît possible de dégager quelques leviers pour mettre en œuvre la flexibilité du bâtiment en tant que stratégie de conception architecturale :

- distinction nette entre les éléments de fonction et de durée de vie différente : structure porteuse, éléments de partition et espaces techniques. Il n'y a qu'un pas dès lors vers la théorie du SAR (Stichting Architecten Research) où les "supports" servent d'appui à des "unités détachables", qui peuvent séparément être construites, modifiées ou remplacées et finalement démolies ;
- adopter un système de coordination modulaire nécessaire pour la prise des décisions lors de la conception et des futures transformations. Le SAR proposait à ce propos une trame modulaire de 10 et de 20 cm. Les 10 cm servant en fait de "bande de négociation" pour ajuster supports et remplissages ;
- favoriser une conception industrialisée par composants normalisés et mobiles, que ce soit pour la structure, les partitions intérieures et extérieures, les équipements, ou le mobilier ;
- proposer un volume initial permettant un agrandissement par l'intérieur, que ce soit par la création de nouveaux planchers, l'aménagement de combles... ou par l'extérieur par l'annexion d'espaces couverts (balcons...) ;
- informer et assister les futurs occupants.

Pour allonger la durée de vie d'un bâtiment, sa conception doit prévoir l'évolution des besoins des usagers actuels et futurs. Sa flexibilité permet de recycler directement l'entièreté du bâtiment et de réduire au maximum les impacts environnementaux des opérations de réhabilitation.



Réhabilitation d'une maison individuelle bioclimatique (Oxford – Royaume uni) **1**
(Architecte S. Roaf).



2 "Modularités des composants" (d'après E. Boucher et J. Rooney-Duval).

Le management environnemental nous amène à nous interroger sur la qualité environnementale des procédés et des produits de construction qui seront utilisés pour la structure, l'enveloppe ou les partitions du bâtiment.

Pour orienter leurs choix, les architectes souhaiteraient pouvoir comparer les différents systèmes constructifs ou matériaux de construction. Or, les écobilans réalisés jusqu'à présent montrent que l'on ne peut pas mettre en avant un produit ou un procédé de construction plutôt qu'un autre, et qu'une comparaison brute n'apparaît pas réaliste sans prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Aucune liste "rouge" ou "verte" n'apparaît réellement envisageable !

Les structures en acier sont fabriquées à partir de matières premières non renouvelables. Leur fabrication nécessite d'importants besoins énergétiques issus généralement de ressources fossiles telles que le pétrole, le charbon ou le gaz. À décharge, ce type de structure est facilement démontable et donc recyclable. Sur chantier, la préfabrication des éléments métalliques permet de réduire considérablement la quantité de déchets de chantier et les sources de nuisances.

Si le béton permet par contre de réduire la charge énergétique lors de sa fabrication, produit ou amené sur chantier, il est souvent source de nombreuses nuisances.

Le bois semblerait par contre plus favorable, pour autant qu'il provienne de forêts locales correctement gérées. Or, de nombreux bois de construction proviennent aujourd'hui encore des pays voisins de la Communauté européenne et parcourent de ce fait plusieurs centaines de kilomètres qui, eux, constituent une lourde charge pour l'environnement. Cependant, le bois a l'énorme avantage de stocker le carbone, et de constituer ainsi un élément pouvant réguler le cycle des émissions de gaz à effet de serre.

En dégagant ainsi les avantages et inconvénients de chaque type de structure, de chaque filière, sèche ou humide, il n'est effectivement pas évident de pouvoir se prononcer. Toutefois, cette prise de conscience constitue le premier pas pour chercher à maîtriser, quantitativement et qualitativement, l'ensemble des impacts environnementaux des procédés de construction qui seront proposés lors de la conception du projet.

Bien qu'aucun procédé constructif ne semble pouvoir être mis en avant, la préfabrication de ces différents éléments, qu'ils soient en bois, en acier, en terre, en béton, ou en carton recyclé, apparaît par contre comme une solution intéressante tant sur le plan environnemental qu'économique. En effet, la fabrication en atelier d'éléments préfabriqués permet de réduire la production de déchets et de limiter les nuisances sur chantier. Elle permet également une plus grande maîtrise des procédés de fabrication, de leurs besoins en énergie, en eau ou en matières premières. De plus, contrairement au chantier, l'atelier est un milieu contrôlé où il est assez facile de pouvoir gérer les pollutions de l'eau et de l'air par des mesures spécifiques et permanentes.

Une autre solution consiste à construire avec des éléments en matériaux recyclés. La maison "Recyhouse" (figure 2) du CSTC en Belgique est construite entièrement à l'aide de matériaux recyclés.

La préfabrication d'éléments de construction en bois, en acier ou en béton favorise l'émergence de solutions respectueuses de l'environnement tout en réduisant les coûts de construction.



Panneau de façade préfabriqué (EGBF-
European Green Building Forum).

1



2 La "Recyhouse à Limette en Belgique (CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction) (Arch. J. Willam).

L'élaboration d'analyses de cycle de vie (appelé aussi écobilans) des produits de construction devient peu à peu une priorité pour les industries européennes du secteur de la construction, se conformant ainsi aux exigences de la directive européenne 89/109 intitulée "Produits de construction".

Toutefois, il reste aujourd'hui encore extrêmement difficile d'obtenir auprès des fabricants des écobilans et d'en vérifier la fiabilité scientifique. De plus, les bases de données existantes, qu'elles soient d'origine suisse, allemande ou hollandaise, ne semblent pas fournir des données suffisamment convergentes pour refléter les procédés de fabrication des produits de construction en Europe.

Si ces difficultés actuelles devraient être rapidement dépassées dans quelques années, l'utilisation d'écolabels apparaît aujourd'hui aux prescripteurs comme le seul outil directif utilisable pour privilégier des matériaux respectueux de leur environnement. En Europe, plusieurs écolabels (figure 1) existent et peuvent être pris en considération lors de la rédaction des cahiers des charges : le label écologique européen, le label français "NF Environnement", le label allemand "Ange Bleu", le label hollandais "Milieukeur", le label autrichien "Umweltzeichen", le label nordique "Cygne Blanc"...

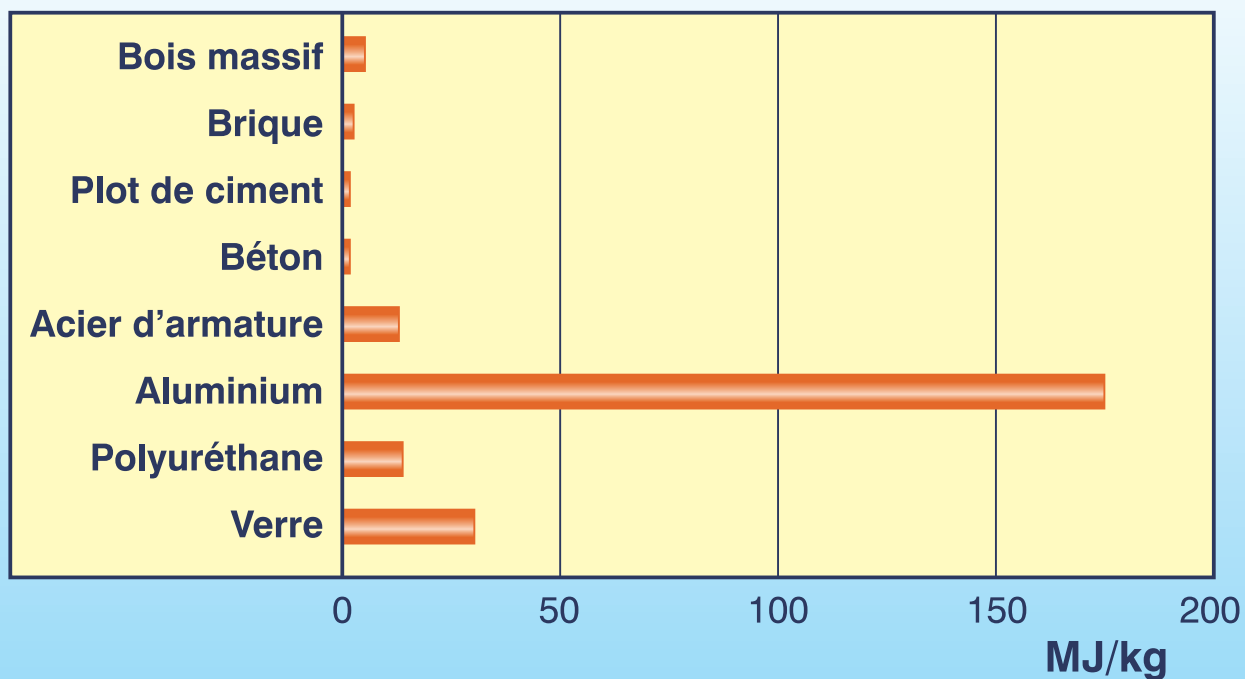
À ces labels, s'ajoutent d'autres critères de sélection qui devraient être aussi pris en compte pour aider les architectes à orienter au mieux leurs choix :

- favoriser l'utilisation de matériaux contenant des matières renouvelables, recyclables ou recyclées : ainsi, les déchets issus du chantier pourront facilement être valorisés ;
- préférer des matériaux issus de productions locales pour réduire la part générée par les transports des matières premières et des produits finis vers le chantier ;
- privilégier des produits de construction dont le contenu énergétique (figure 2) est le plus faible possible sachant qu'il existe pour la plupart des matériaux une corrélation forte entre l'énergie grise et leurs émissions de gaz à effet de serre ;
- appliquer le principe de précaution pour les produits de construction dont les connaissances actuelles ne permettent pas de connaître précisément les impacts en matière de santé ;
- utiliser tout particulièrement des matériaux de construction permettant d'apporter une plus-value en terme de confort d'usage (confort thermique, visuel ou acoustique) et permettant de réduire autant que possible les besoins énergétiques du bâtiment ;
- vérifier que les opérations d'entretien ou de maintenance des produits de construction seront compatibles avec les moyens dont disposera le maître d'ouvrage ou son gestionnaire.

L'analyse du cycle de vie (ACV) d'un produit est une méthode d'évaluation des impacts sur l'environnement et sur les ressources naturelles, d'un produit, d'un service ou d'une activité, depuis l'extraction des ressources naturelles jusqu'à l'élimination du produit en fin de vie.



Écolabels européens. 1



2 Énergie grise de différents matériaux de construction (LESO - Laboratoire d'Énergie Solaire de l'EPFL).

Compte tenu de l'importance des quantités de déchets produits annuellement par le secteur du bâtiment, la valorisation des déchets de chantier doit rapidement devenir une priorité incontournable.

En France, à partir du 1^{er} juillet 2002, seuls les déchets ultimes, c'est-à-dire ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités ou valorisés notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant, seront autorisés à être déposés en centre de stockage (décharge). Cette disposition concerne tous les déchets, y compris les déchets de chantier provenant de la construction, de la réhabilitation et de la démolition des bâtiments. Elle concrétise finalement dans le secteur du bâtiment les mesures envisagées pour le renforcement des réglementations européennes visant la protection de l'environnement :

- directive européenne 91/156/EC du 18 mars 1991 relative à l'élimination des déchets. Cette directive fait référence au catalogue européen des déchets ;
- directive européenne 94/62/EC du 20 décembre 1994 relative aux déchets d'emballage ;
- directive européenne 91/689/EC du 22 décembre 1994 relative aux déchets dangereux dont les déchets industriels spéciaux ;
- directive européenne 87/101/EC du 22 décembre 1986 concernant les huiles usagées ;
- directive européenne 96/59/EC du 16 septembre 1996 concernant l'élimination des PCB et PCT ;
- directive européenne 91/157/EC du 18 mars 1991 relative aux piles et accumulateurs.

Sur chantier, l'application de ces nouvelles exigences réglementaires devrait conduire à modifier les habitudes de travail des ouvriers. Un pré-tri des déchets devra être désormais organisé par les entreprises en fonction des volumes attendus et des filières locales de valorisation existantes. Cette nouvelle responsabilité demandera l'intervention de chaque entreprise pour le transport de ses propres déchets vers les bennes mises à disposition sur chantier, et ensuite vers les filières de valorisation. Le coût réel de la gestion des déchets de chantier devrait alors transparaître dans les remises de prix proposées par les entreprises. À cet effet, des postes séparés devront être prévus dans les documents de marché pour prendre en compte les différents types de déchets, le coût du transport, du chargement/déchargement, du tri et de l'évacuation vers les filières *ad hoc*.

Dans tous les cas, les déchets seront séparés au moins en quatre catégories :

- emballages (verre, métaux, bois non traité...) ;
- déchets inertes (gravois, céramique, béton propre...) ;
- déchets industriels banals (PVC, isolant, plâtre...) ;
- déchets industriels spéciaux (silicones, huiles, peintures, amiante-ciment...).

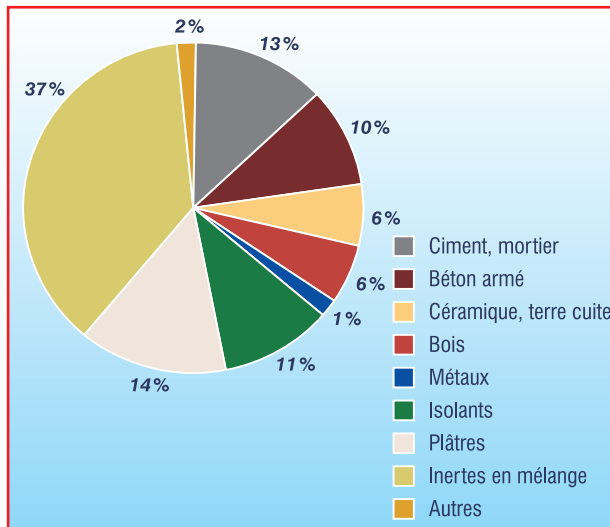
Le tri final sera réalisé dans un centre de tri spécialisé ou directement sur le chantier. Les déchets ainsi séparés partiront ensuite vers les filières de recyclage ou de valorisation (figure 2).

Si les entreprises du bâtiment ont un rôle essentiel à jouer dans l'organisation du tri des déchets sur le chantier, les architectes doivent, eux aussi, contribuer au management environnemental du chantier :

- en prescrivant certaines impositions en matière de déchets, et en organisant la gestion des déchets de construction ou de démolition ;
- en pratiquant certains choix de nature à réduire à la source la production des déchets, en étudiant par exemple avec précision le calepinage des matériaux.

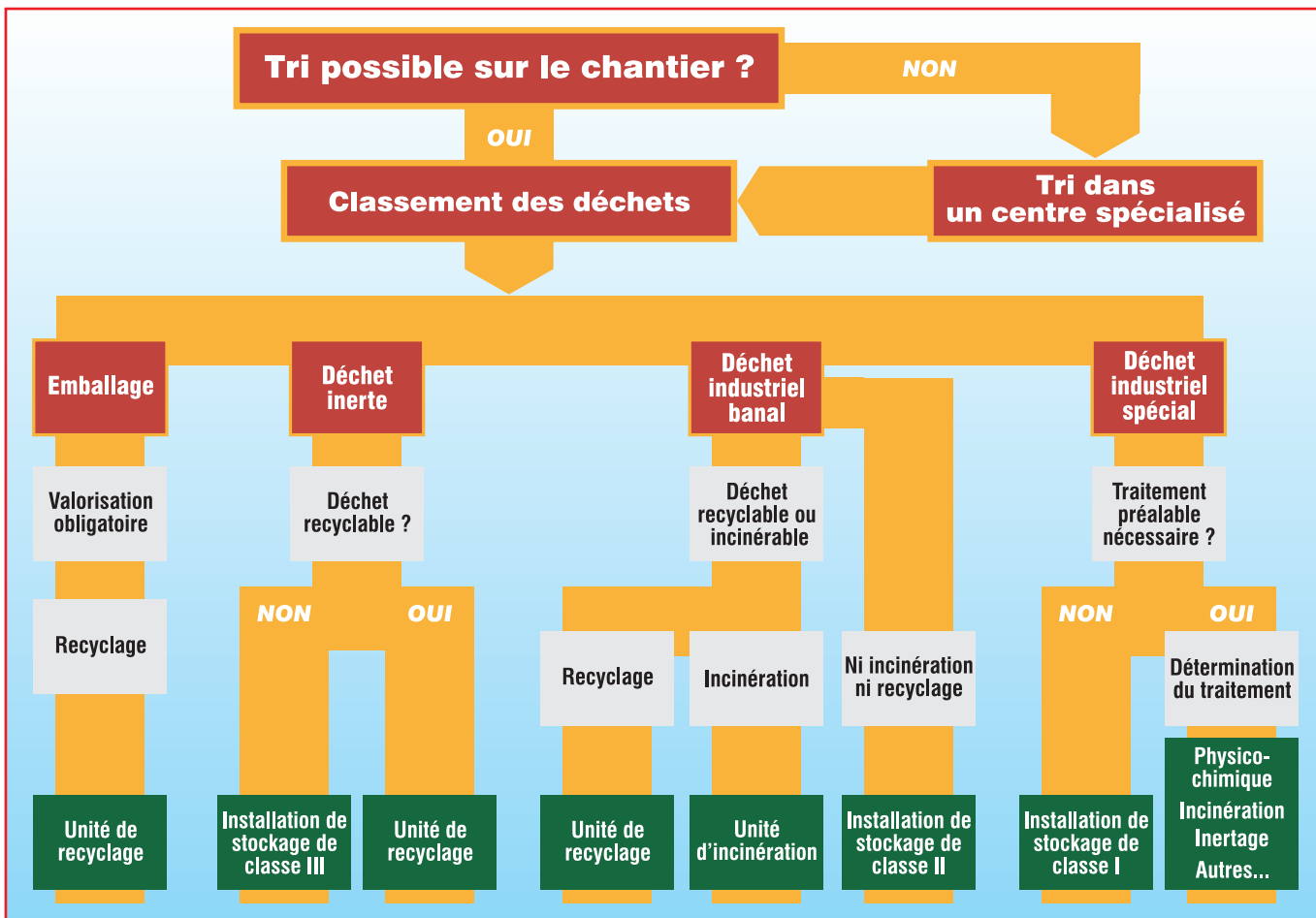
Cette contribution n'est pas négligeable puisque la réduction de la production de déchets à la source peut constituer à elle seule un gain (en volume) de l'ordre de 20 à 30 % !

Plus de 40 % des déchets produits en Europe proviennent de la construction, de la réhabilitation ou de la démolition des bâtiments. Moins de 5 % sont aujourd'hui valorisés.



Composition des déchets de chantier (hors emballages) (ADEME).

1



2 Organigramme d'élimination des déchets (ADEME).

Outre la gestion des déchets de chantier, les entreprises du bâtiment et les maîtres d'œuvre se doivent de maîtriser les nuisances produites par les activités temporaires de chantier. Des mesures pourront être ainsi mises en œuvre pour :

- réduire le bruit de chantier :
 - réduction des émissions sonores pour les ouvriers et les riverains ;
 - réduction des réceptions sonores pour les ouvriers.
- réduire les pollutions de la parcelle et du voisinage :
 - réduction des émissions polluantes atmosphériques ;
 - réduction de la production de déchets liquides polluants ;
 - gestion spécifiée des déchets liquides polluants produits (récupération, assurance du traitement après enlèvement).
- maîtriser les autres nuisances :
 - réduction de la production de poussière et de boue ;
 - aménagement de la délimitation du chantier ;
 - réduction de la salissure du voisinage et de la perturbation du trafic routier avoisinant.

Conscient de l'importance des effets des nuisances sonores sur la santé, les législations en vigueur se renforcent et complètent les textes réglementaires existants au niveau des collectivités locales (niveaux sonores, horaires d'émission...). Ainsi, le Parlement européen et le Conseil ont harmonisé les législations des États membres en éditant la directive européenne 2000/14/CE qui entrera en application dès 2002. Cette directive concerne également les équipements utilisés sur les chantiers.

Bien que la réduction des nuisances sonores provenant des chantiers concerne davantage les entreprises du bâtiment, l'équipe de maîtrise d'œuvre peut également opérer à plusieurs niveaux :

- choisir des systèmes constructifs ou techniques limitant l'utilisation par les entreprises d'engins ou de matériels bruyants (ex : préférer dans la mesure du possible des fondations avec des pieux forés plutôt que des pieux battus) ;
- prescrire dans les cahiers des charges des clauses précises pour favoriser l'utilisation par les entreprises d'engins et de matériels moins bruyants ;
- contrôler sur chantier que ces prescriptions sont bien respectées par les entreprises réalisant les travaux de construction ou de démolition. Des mesures sur site pourront éventuellement être réalisées par le maître d'ouvrage ou par le maître d'œuvre ;
- informer les riverains des mesures qui seront prises tout au long du chantier.

Sur chantier, des mesures complémentaires pourront éventuellement être mises en œuvre par les entreprises pour répondre aux objectifs souhaités par le maître d'ouvrage, comme par exemple :

- mise en place de palissade de sécurité antibruit ;
- privilégier le matériel électrique de préférence pneumatique ;
- utiliser le serrage à clé pour le matériel de coffrage ;
- insonoriser les engins ou matériels fixes ;
- utiliser du matériel de chantier agréé CE (mars 86) ;
- préférer des aiguilles de vibrage de chantier non bruyantes ;
- faire attention au choix de l'implantation de la centrale à béton ;
- gérer le trafic et les horaires du chantier.

Ce travail sera mené dans tous les cas en concertation avec le coordinateur sécurité-santé et le coordinateur de chantier.

Le bruit est la première cause de stress. La réduction des niveaux sonores émis par les équipements de chantier protège la santé et le bien-être des ouvriers et des riverains.



1 Serrage à clé pour coffrages (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).



2 Limiter les nuisances sonores causées par les équipements de chantier (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).

Outre les déchets de construction ou de démolition, un chantier peut produire des pollutions variées du sol, des eaux de la nappe phréatique et de l'air.

Si cette question concerne en priorité les entreprises du bâtiment ou les fabricants de produits de construction, des solutions existent et peuvent être proposées par les concepteurs lors de la rédaction des prescriptions établies pour les cahiers des charges et la mise en place d'un "chantier respectueux de l'environnement" :

- interdiction de brûler les déchets sur chantier (même les cartons et le bois !) ou de les enfouir ;
- prévoir des bacs de rétention pour le traitement des eaux chargées avant rejet dans le milieu naturel : eaux de lavage des outils utilisés sur chantier ou de la centrale à béton... ;
- préférer des coffrages sans huiles ou des huiles de décoffrage à base végétale moins nocives pour l'environnement ;
- utiliser des fûts posés sur un bac de rétention et à l'abri des intempéries pour le remplissage des pulvérisateurs des huiles de décoffrage ;
- choisir des produits et techniques moins nocifs pour l'environnement et la santé des ouvriers tels que les colles à base de résines acryliques en dispersion et sans solvant organique, les peintures à phase aqueuse... ;
- interdire l'utilisation des produits étiquetés R20 à R29, R31 à R33, R39, R40, R45 à R49.

Ces solutions sont généralement peu coûteuses. Elles nécessitent par contre d'informer au préalable les ouvriers du chantier pour que d'autres habitudes de travail puissent être prises à l'avenir en fonction des nouvelles techniques ou produits utilisés.

Les entrepreneurs ne sont pas seuls responsables : maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrages peuvent ensemble inciter à ce que des mesures soient prises sur chantier pour réduire les pollutions des sols, des eaux et de l'air :

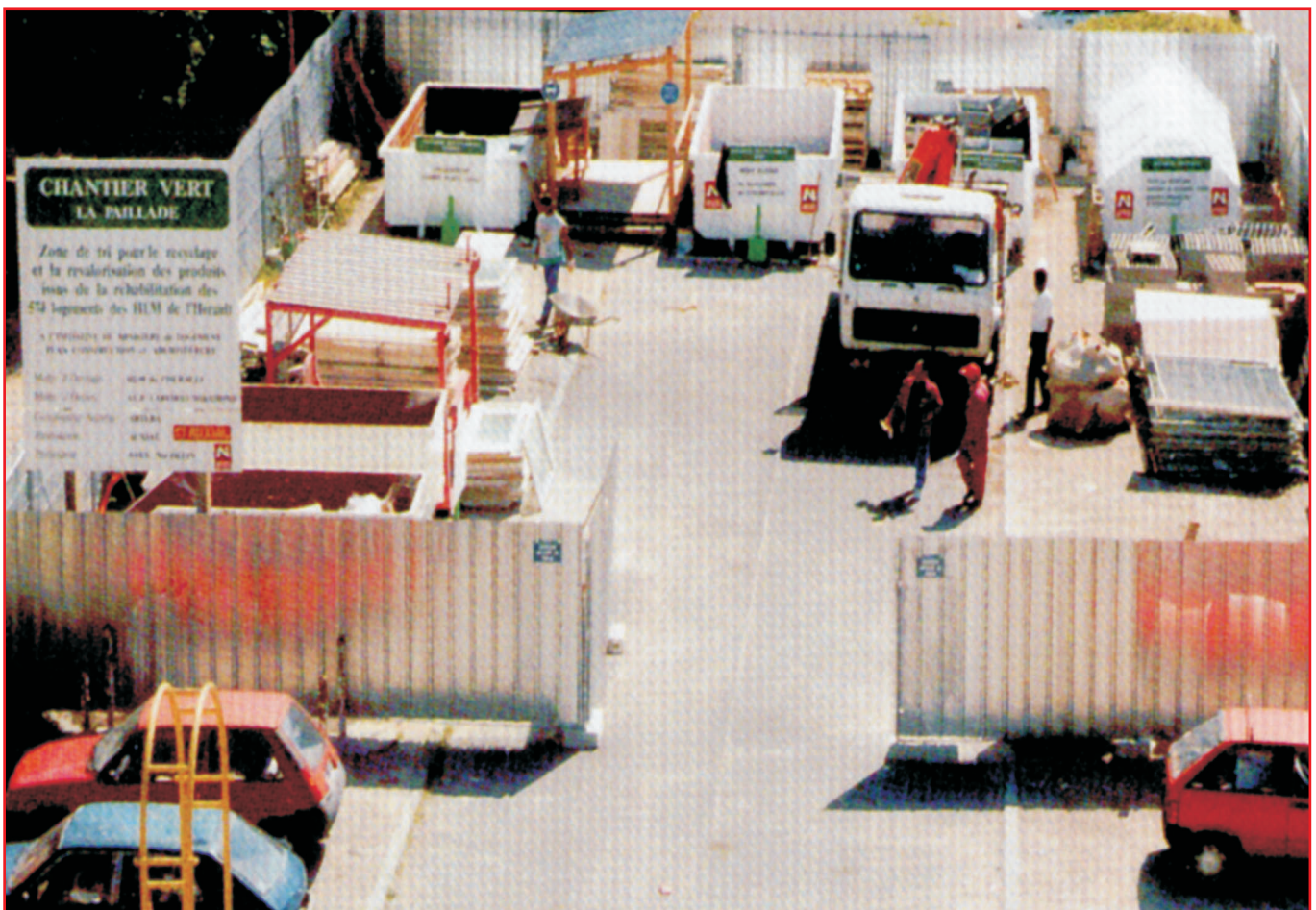
- en prescrivant des impositions de moyens ou de résultats, et en marquant clairement dans chaque cahier des charges les intentions environnementales de l'opération de construction ou de réhabilitation en question ;
- en sélectionnant l'entreprise sur d'autres critères que seulement le critère de coût !

Un chantier peut être responsable de pollutions directes des sols, des eaux ou de l'air : huiles de décoffrage, eaux de lavages des centrales à béton, peintures...



Huiles de décoffrage (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).

1



2 Organisation d'un chantier respectueux de l'environnement (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).

En milieu urbain, les activités de chantier induisent généralement de nombreuses perturbations du voisinage proche, qui sont parfois à l'origine de conflits entre les habitants et les entreprises.

Mises à part les nuisances sonores, l'une des perturbations considérée en général comme la plus importante par tous les riverains de chantier porte sur la propreté aux abords du chantier. Rappelons que les entreprises sont responsables de la propreté de leur chantier et des salissures qu'ils peuvent occasionner : poussières, boues abandonnées sur la chaussée par les camions, déchets s'envolant...

Pour remédier à ces problèmes, des solutions existent et mériteraient d'être plus régulièrement mises en œuvre pendant les phases les plus "salissantes" du chantier (terrassement, gros-œuvre...). Par exemple, il est possible d'étaler des gravats "propres" sur la voie d'accès ou de mettre en place un décrotteur de roues permettant ainsi de nettoyer les roues des camions avant leur sortie sur la voirie. Dans certains cas, ces procédés simples peuvent s'avérer indispensables.

Une autre gêne concerne celle du trafic automobile, des piétons ou des cyclistes, lorsque le chantier s'est approprié une partie de la voie publique. Dans ce cas, et conformément aux réglementations en vigueur, une signalisation complémentaire de couleur jaune est mise en place pour sécuriser la circulation locale.

Des mesures complémentaires peuvent également être prises par les entreprises afin d'assurer la sécurité des piétons lors du passage des personnes sous des échafaudages situés sur le domaine public.

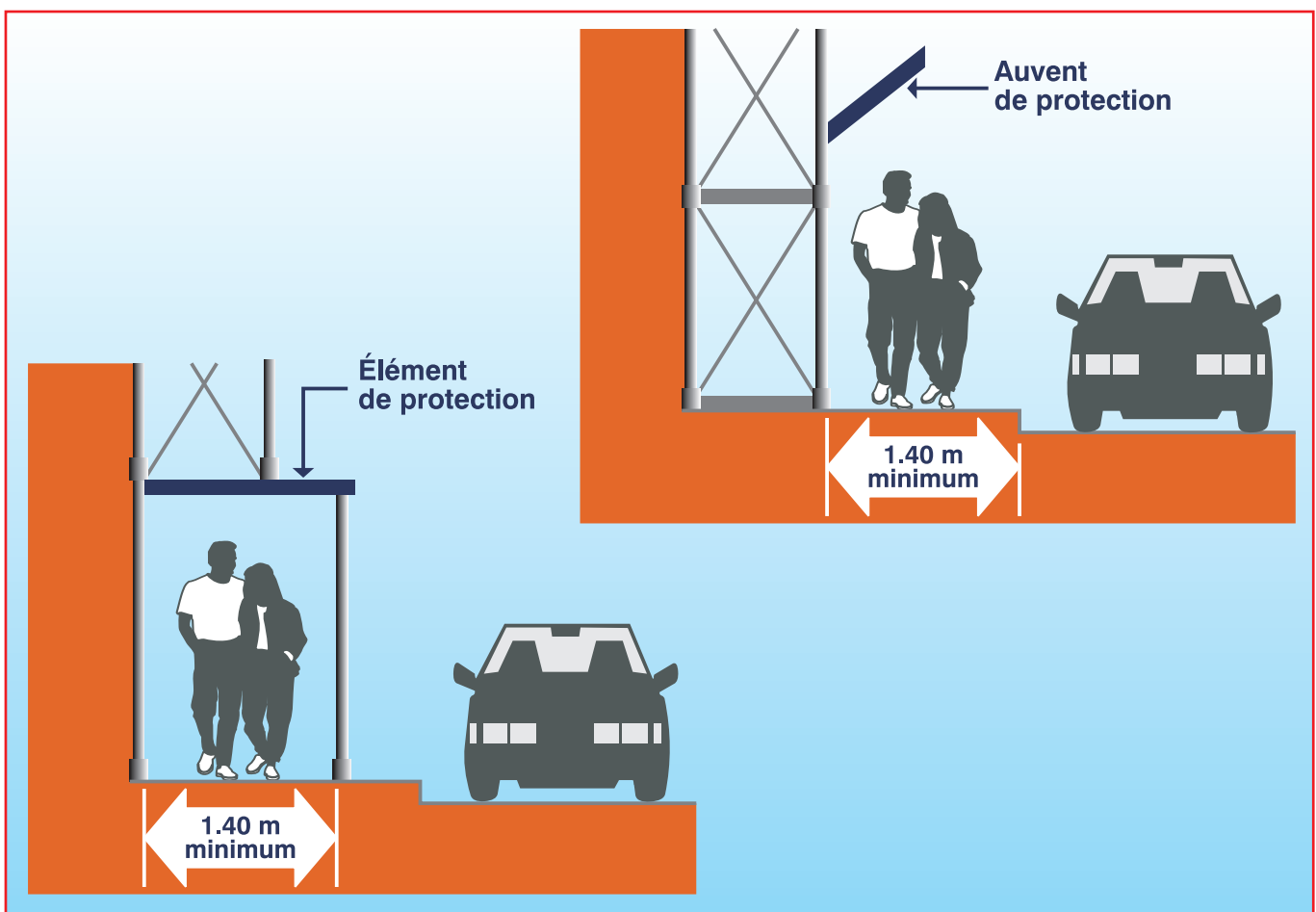
Dans certains cas, les horaires du chantier, les heures de travail et de livraisons, peuvent être adaptés au contexte afin de ne pas perturber la circulation locale.

Si les entreprises sont concernées au premier plan par la sécurité et la propreté de leurs chantiers, l'organisation de la sécurité sur le chantier devrait être étudiée le plus en amont possible, dès la conception du projet, par la maîtrise d'œuvre en concertation avec le coordonnateur sécurité santé.

Passages de camion, poussières et boues issues du chantier, perturbation de la circulation piétonne, suppression de places de stationnement... constituent, pour les riverains, autant de gênes de chantier qui demandent d'être mieux maîtrisées.



Décrotteur de roues (CERN - Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire). **1**



2 Dispositifs de sécurisation des cheminements piétons.

Les perturbations causées en milieu urbain par les activités de chantier sont parfois à l'origine de conflits entre les habitants et les entreprises.

Si un chantier reste un chantier, les actions de communication conduites avant et pendant le chantier permettent de gérer les tensions latentes. Lors des réunions de communication prévues, chacun peut s'exprimer. Les riverains peuvent faire part de leurs inquiétudes et des troubles d'usage qu'ils rencontrent. Les entreprises du bâtiment peuvent à leur tour expliquer les efforts qu'ils fournissent quotidiennement pour réduire les nuisances que rencontrent les habitants du quartier environnant. En s'exprimant, chaque partie permet ainsi de dépasser ces situations souvent conflictuelles et de déboucher vers des solutions acceptables pour les uns et les autres.

À titre d'exemple, avant le commencement du chantier, le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre peut, par des questionnaires "toutes boîtes", des entretiens individuels ou organisés en groupe de travail, chercher à établir la communication avec les riverains pour prendre en compte dans l'organisation même du chantier certaines contraintes directes. Ces actions de communication permettent de plus d'apporter aux habitants du quartier environnant des informations précises sur le déroulement du chantier : durée, nuisances probables, actions entreprises...

Au début du chantier et ensuite tout au long de son développement, il peut être utile d'organiser une ou plusieurs réunions d'information pour expliquer les actions menées par les entreprises pour limiter les perturbations. Ces échanges peuvent aussi devenir l'occasion pour les riverains ou leurs représentants d'établir une liste des problèmes rencontrés.

Outre ces rencontres directes entre entreprises et riverains, d'autres outils de communication peuvent également être utilisés tels que les panneaux de chantier, la mise en place d'une boîte aux lettres pour le recueil des plaintes, l'envoi de documents d'informations...

Ces différentes actions de communication demandent d'être planifiées et structurées le plus en amont possible en concertation entre le maître d'ouvrage, le coordinateur santé sécurité, le maître d'œuvre et les entreprises désignées.

La communication entre les entreprises et les riverains permet de gérer positivement les conflits latents dus aux nuisances générées par les activités menées sur un chantier.



Panneau d'information de chantier (Italie). 1



2 Exemple d'un panneau de chantier sur les moyens mis en œuvre pour le tri des déchets (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).

Compte tenu de l'engagement des pays de l'Union européenne à Kyoto en 1997, une réduction d'au moins 8 % des émissions de CO₂ passe par des mesures conjointes portant sur le secteur des transports et celui du bâtiment.

Dans ce contexte, l'architecture bioclimatique apparaît comme l'une des réponses pour réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de CO₂ en profitant au maximum des apports bénéfiques de l'environnement, et plus particulièrement du soleil comme source d'énergie inépuisable, renouvelable et non-polluante.

Néanmoins, si le projet bioclimatique doit être parfaitement maîtrisé tant constructivement que techniquement lors de sa conception, il ne peut ignorer la "bio-spécificité" des occupants : particularités socio-culturelles, comportements, nombre... Sans la participation directe des occupants, les gains espérés peuvent vite être réduits. À cet effet, l'exemple du projet de Baggesensgade au Danemark est très révélateur. Après information des occupants et adaptation du projet, les économies d'énergie atteignirent plus de 27 % !

L'architecture bioclimatique fait appel à des procédés passifs et ne requiert pas de techniques particulières. Elle demande d'abord du "bon sens". Des simulations thermiques dynamiques permettent ensuite d'affiner la conception du bâtiment et de comparer différentes solutions. Ces études nécessitent des connaissances spécifiques en physique du bâtiment que les architectes se doivent d'acquérir.

Trois stratégies résument l'approche bioclimatique :

- la stratégie du chaud permettant de capter les apports solaires gratuits, de les conserver ou de les stocker au sein du bâtiment, puis de les distribuer vers les locaux ;
- la stratégie du froid minimisant les besoins de rafraîchissement en proposant des protections solaires adaptées aux différentes orientations, en évitant les risques de surchauffe par une isolation appropriée ou par l'inertie du bâtiment, en dissipant l'air chaud et en le rafraîchissant ;
- la stratégie de l'éclairage visant à capter au maximum l'éclairage naturel et à le répartir dans les locaux tout en se protégeant et en contrôlant les sources d'inconfort visuel.

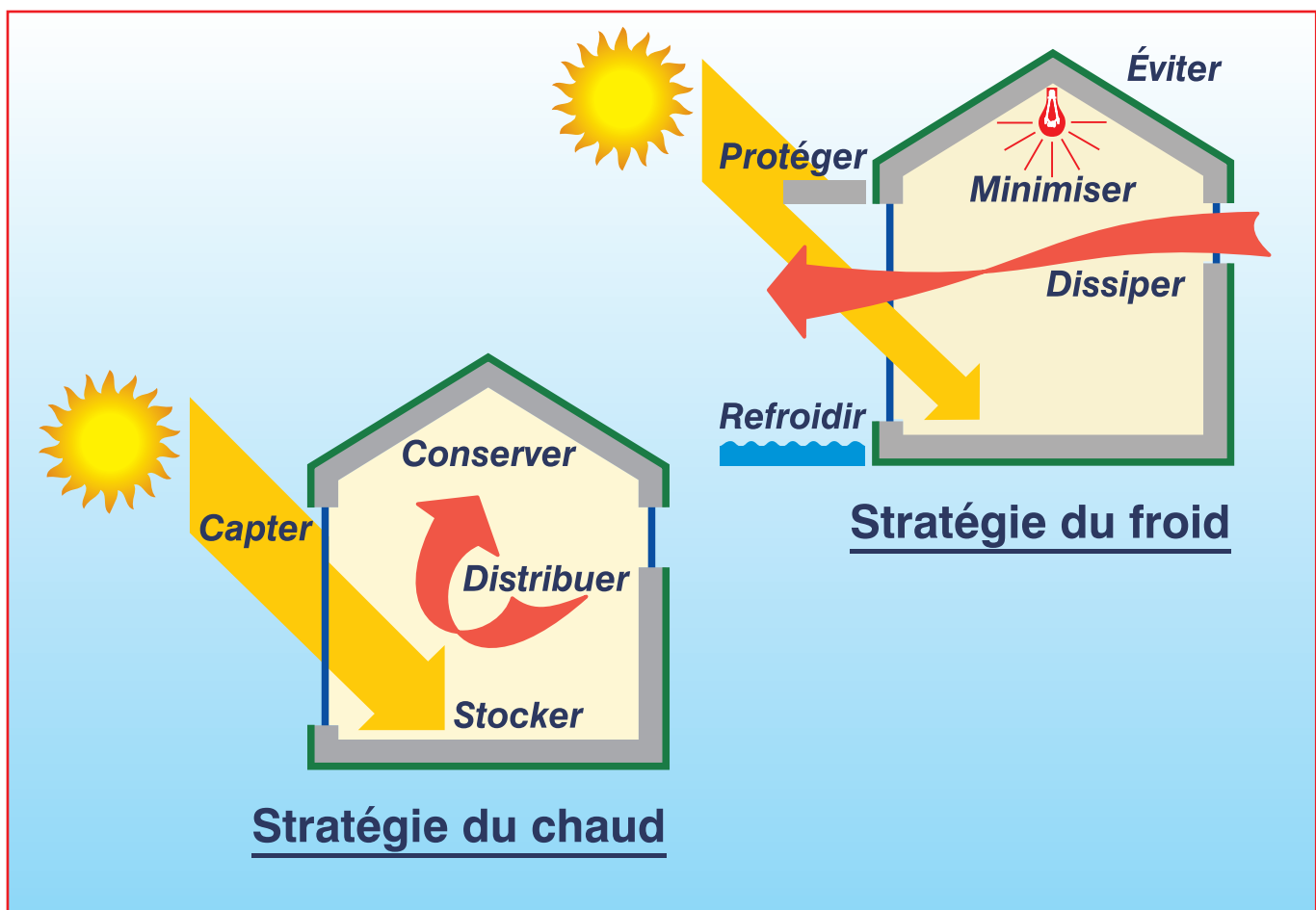
Pour la plupart des climats européens, l'application de ces seuls principes permet bien souvent d'éviter de climatiser les bâtiments et de réduire au maximum la période de chauffe ou de rafraîchissement. Plusieurs projets réalisés ces trente dernières années ont démontré concrètement les nombreux intérêts de ces principes, tant en terme de gain de consommation que de plus value apportée en terme de qualité des ambiances : la maison Jaspard en Belgique (figure 1) en est un exemple.

La construction de bâtiment climatique pourrait définir dans les années à venir un standard de construction en Europe limitant ainsi le besoin total d'énergie finale pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et l'électricité à moins de 50 kWh/m².an. Une telle valeur équivaldrait en moyenne au tiers des consommations énergétiques des immeubles d'habitation construits actuellement en Europe.

L'architecture bioclimatique permet d'offrir aux occupants des ambiances de qualité tout en réduisant les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre.



Maison de l'architecte Philippe Jaspard (Belgique). **1**



2 Les concepts du confort d'hiver et du confort d'été (d'après Architecture et Climat).

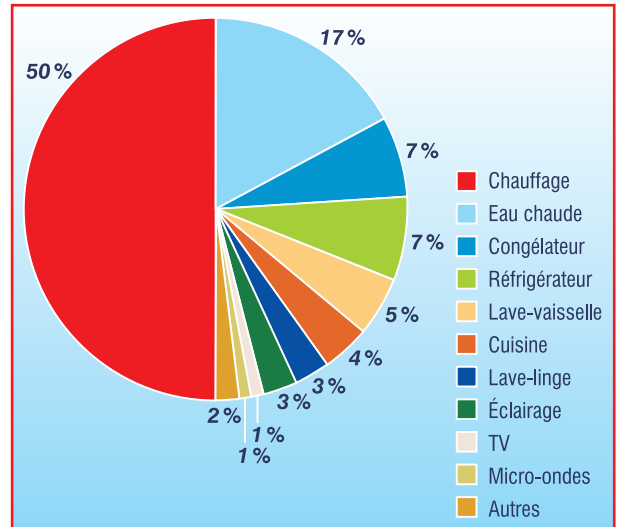
Si la conception bioclimatique d'un bâtiment constitue l'une des premières étapes incontournable pour réduire la consommation d'énergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire et de ventilation constitue une seconde étape de la conception. Cette deuxième étape franchie, les consommations de chauffage et des équipements techniques étant réduites au maximum, le management environnemental de l'opération demande également la participation des usagers. En effet, nous devons nous préoccuper aussi de la consommation des appareils électriques (réfrigérateurs, congélateurs, cuisinière, luminaires, machines à laver...) qui devient de plus en plus prépondérante dans les logements en Europe.

Si le renforcement de l'isolation permet aujourd'hui de limiter considérablement les pertes thermiques des parois (murs, fenêtres, toitures...), de nombreux efforts doivent encore être entrepris pour optimiser la ventilation des bâtiments. Les pertes par ventilation augmentent non seulement en fonction du volume du bâtiment, de la fréquence horaire du renouvellement de l'air et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, mais aussi en fonction des pertes par manque d'étanchéité. Pour limiter ces pertes, différentes mesures peuvent être prises. Il existe notamment des systèmes de ventilation double flux pouvant récupérer par des échangeurs statiques ou rotatifs plus de 50 % de la chaleur extraite, et qui permettent de préchauffer l'air frais entrant. Ce qui permet d'apporter une économie de l'ordre de 50 à 80 % de l'énergie thermique consommée par le renouvellement de l'air.

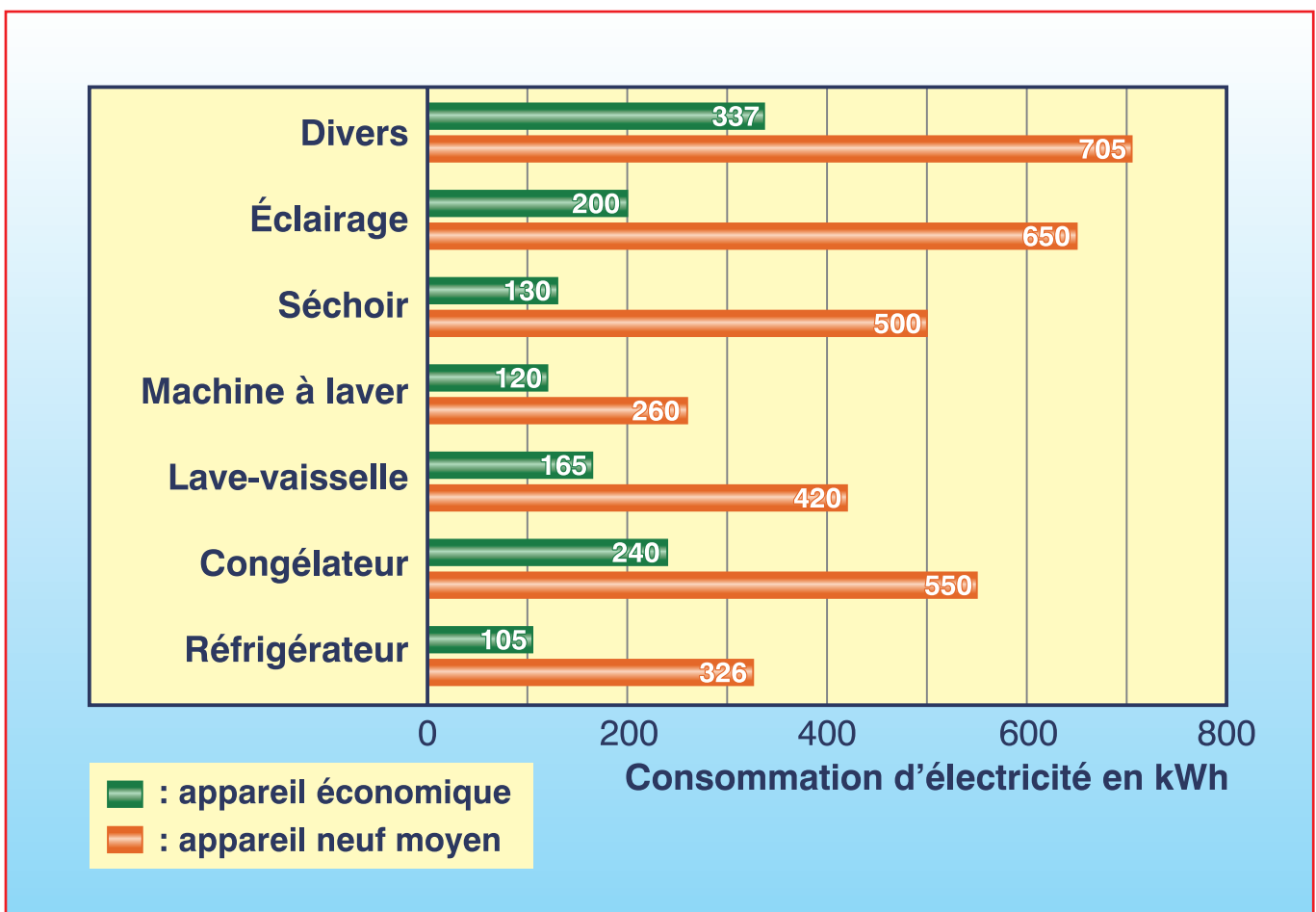
Après le chauffage, l'eau chaude sanitaire (figure 1) est le poste le plus important en terme de consommation d'énergie des ménages. Il représente en général plus de 10 % de la consommation énergétique moyenne d'un ménage de 4 personnes. Pour réduire la consommation moyenne, des mesures simples peuvent être mises en œuvre : installation de douches économiques, de limiteurs de débit à la sortie du robinet, calorifuger les conduites d'eau chaude, installation d'un chauffe-eau solaire... En effet, à titre d'exemple, une douche économique permet de réduire la consommation d'eau à 6 litres d'eau par minute, soit de la moitié d'un pommeau de douche classique. L'installation d'un chauffe-eau solaire permet de produire, selon les climats, l'eau chaude du ménage durant la saison chaude et de préchauffer l'eau durant les autres saisons.

Outre la consommation électrique pour l'éclairage, un ménage européen consomme en moyenne 3 700 kWh/an d'électricité dont 80 % est utilisé pour les appareils électroménagers. Avant d'acheter de nouveaux électroménagers, il convient donc de s'informer sur leurs consommations énergétiques et de privilégier par exemple des réfrigérateurs et des congélateurs de type A ou B selon "l'étiquetage énergie" (application de la directive européenne 92/75/CE). Les lampes fluo-compactes basse-énergie de 15 W permettent de remplacer une ampoule à incandescence de 75 W. Remarquons que la consommation en veille d'un téléviseur et de ses périphériques peut atteindre 500 kWh/an. Ces petits gestes quotidiens peuvent parfois apparaître comme "une goutte d'eau dans la mer". Au contraire, ils contribuent directement à réduire les consommations énergétiques et donc les émissions de gaz à effet de serre de moitié.

Plus de 40 % de la consommation énergétique moyenne d'un ménage sont imputés aux appareils électriques, hors eau chaude sanitaire (ECS).



Consommation énergétique moyenne d'un ménage (EDF). **1**



2 Comparaison entre les équipements électriques (Greenpeace Belgium).

Après une phase d'expérimentation, différents programmes communautaires (Joule, Thermie, Save...) ont permis le développement et l'expérimentation des technologies exploitant le potentiel fournit par le vent, le soleil, la terre... Les "énergies renouvelables" sont aujourd'hui arrivées pour la plupart à maturité. Elles peuvent donc être diffusées à large échelle et compléter les mesures prises pour réduire les consommations énergétiques du secteur du bâtiment, pour limiter la consommation d'énergies fossiles ou d'électricité, et pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

La palette de techniques possibles apparaît assez large pour que chacun puisse trouver celle qui convient à chaque projet :

- l'énergie éolienne ;
- l'énergie solaire ;
- la biomasse (bois, paille...) ;
- le biogaz ;
- l'hydraulique ;
- la géothermie ;
- l'énergie issue de la houle, les courants marins ou les marées...

La plupart de ces technologies sont aujourd'hui parfaitement maîtrisées et peuvent être utilisées par :

- les particuliers, en mettant en œuvre des panneaux solaires pour l'eau chaude sanitaire ;
- les collectivités, en utilisant des chaudières au bois comme source principale de chauffage de bâtiments publics ;
- les producteurs d'électricité, en décentralisant la production d'électricité et en exploitant le potentiel éolien ou hydraulique.

L'utilisation d'énergies "propres" et renouvelables constitue en effet l'un des axes prioritaires des politiques énergétiques menées en Europe pour assurer un développement durable et ce pour plusieurs raisons :

- objectif écologique : elles contribuent à la protection de l'environnement et répondent très concrètement aux objectifs fixés à Kyoto ;
- objectif social : elles génèrent des emplois et du bien-être social ;
- objectif politico-économique : elles assurent l'indépendance énergétique de l'Union européenne et permettent de limiter les effets d'une hausse éventuelle du prix du pétrole.

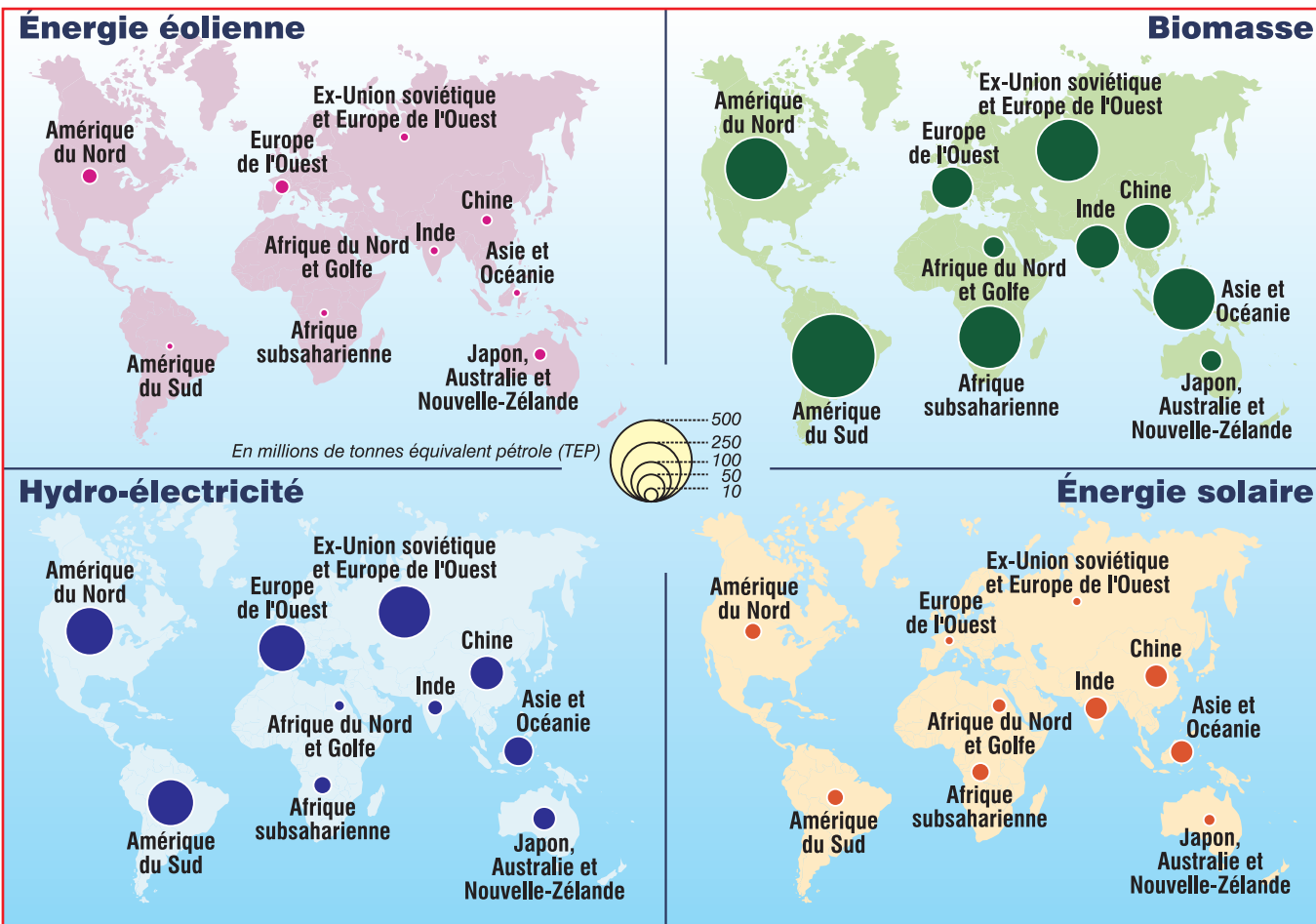
C'est dans ce sens que la Commission européenne a rédigé son livre blanc (chapitre 10) en 1993 et a adopté plus récemment, en décembre 2000, la directive 2001/77/CE relative au développement des énergies renouvelables comme source de production d'électricité. Cette directive définit les lignes directrices de cette politique et fixe aux différents États membres l'objectif d'atteindre pour 2010 12 % de la consommation intérieure produite à partir des énergies renouvelables, soit 23,5 % de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables. La France s'est fixée quant à elle l'objectif d'atteindre 21 % d'électricité à partir des énergies renouvelables pour 2010.

L'utilisation de ressources énergétiques "propres" et renouvelables constitue l'un des axes prioritaires de l'Union européenne pour répondre au protocole de Kyoto.



Habitat photovoltaïque Nieuw Sloten à Amsterdam (Pays-Bas).

1



2 Le potentiel d'exploitation des énergies renouvelables dans le monde (CNRS).

Cette exigence concerne non seulement la qualité des équipements de chauffage, mais aussi le choix de la ou des ressources énergétiques qui seront utilisées pour les différents usages du bâtiment. Chaque système technique a un impact sur l'environnement lors de son usage. Hormis les énergies renouvelables autres que le bois, plusieurs autres ressources énergétiques existent :

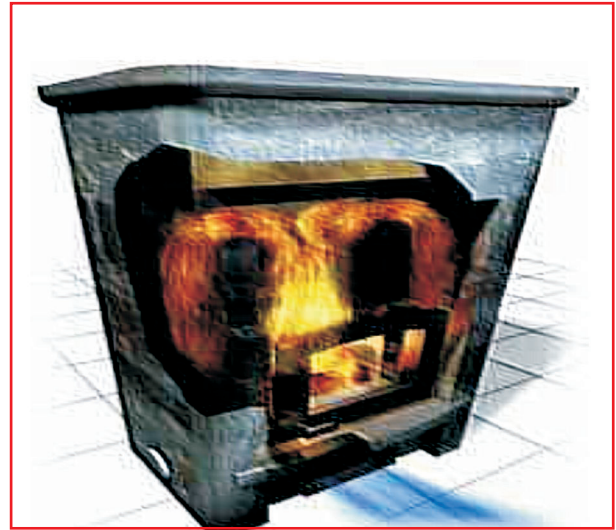
Ressources énergétiques principales	Effet de serre		Pluies acides	
	Émissions de CO ₂ (g/kWh)	Émissions de CH ₄ (g/kWh)	Émissions de SO ₂ (g/kWh)	Émissions de NO _x (g/kWh)
Charbon	360	28	2,58	0,95
Fioul	280	0,4	0,52	0,52
Bois				0,32
Gaz	180	1,5		0,17
Électricité en usage permanent	66	0,27	0,4	0,17
Électricité en usage hivernal	383	1,6	2,2	0,92

Source : statistiques production et consommation 1995 EDF

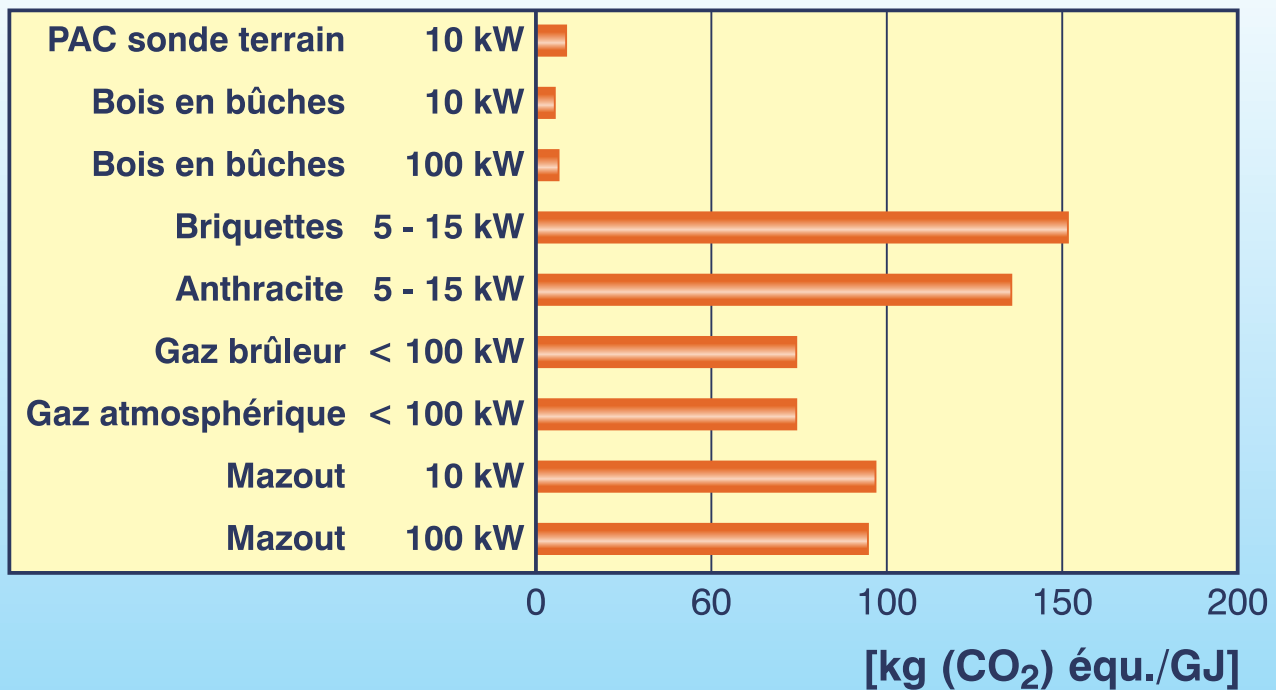
Remarquons qu'il convient de différencier pour l'électricité son usage hivernal de son usage permanent et qu'il faut la différencier par rapport aux autres ressources énergétiques. De plus, en France, la production d'électricité provient largement du nucléaire (plus de 75 %). Des énergies fossiles sont utilisées en complément, surtout en hiver où la consommation est la plus importante. Son impact sur l'environnement n'étant pas négligeable, l'électricité ne peut donc pas être comptabilisée comme les autres. Il est donc d'ailleurs souvent préférable de se référer non pas à l'énergie produite ou consommée, mais à l'énergie primaire. Il faut en effet consommer environ 2 à 3 kWh d'énergies fossiles pour produire 1 kWh d'électricité.

Le chauffage au bois apparaît de plus en plus comme une solution pertinente dans certaines régions d'Europe car elle permet de limiter les émissions polluantes dans l'atmosphère et d'utiliser les ressources renouvelables locales. De plus, par rapport au cycle du carbone, l'utilisation de bois est neutre puisqu'il ne s'agit pas de carbone fossile comme pour les autres ressources énergétiques traditionnelles. Grâce aux techniques actuelles, le chauffage au bois peut donc être considéré comme le combustible le plus propre connu aujourd'hui. La consommation annuelle de bois est d'environ 2,5 stères de bois feuillu pour 100 m² de surface chauffée.

Le chauffage au bois permet de limiter les émissions polluantes dans l'atmosphère : CO_2 , CH_4 , SO_2 , NO_x .



Chauffage au bois (Énergie 2000). **1**



2 Émissions de CO₂ par les équipements de chauffage selon l'énergie utilisée (LESO - Laboratoire d'Énergie SOLAIRE de l'EPFL).

L'eau, c'est la vie. De tout temps et de toute région du monde, l'eau est considérée comme un bien précieux et capricieux. Les fêtes consacrées à l'eau sont nombreuses : rites de l'appel à la pluie, fêtes de l'eau, attente de la mousson, eau purificatrice... La double personnalité de ce dieu, le destructeur et le bienfaiteur, traverse toutes les cultures. L'eau, c'est la vie. Sans eau, c'est la mort. L'eau en mouvement fait tourner les moulins. L'eau se déchaîne, et c'est la mort.

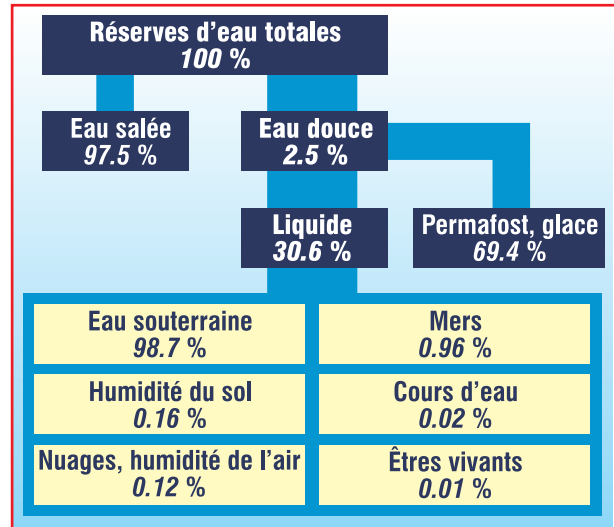
La Terre est vue de l'espace comme une énorme boule bleue en raison de sa surface principalement constituée d'eau. Elle est la seule planète du système solaire où l'eau abonde et où des milliers d'espèces vivantes ont pu voir le jour grâce aux propriétés physiques et chimiques de l'eau dans les réactions métaboliques des cellules vivantes. Sur presque toute sa surface, l'eau est présente sous forme liquide en raison de son point d'ébullition élevé. En certains points ou suivant les saisons, l'eau gèle en surface et flotte. La glace a un pouvoir isolant et protège les êtres vivant dans l'eau des gelées extrêmes en surface.

La majorité de l'eau présente sur la Terre se présente sous forme d'eau salée dans les mers et les océans. Une grande partie d'eau douce se situe aux pôles sous forme de glace. L'eau douce liquide ne dépasse pas 1 % de la masse totale des réserves d'eau du globe. De plus, sa distribution est inégalement répartie sur la surface du globe. Les paysages diffèrent fortement d'un côté à l'autre de la planète : déserts, forêts luxuriantes, oasis en plein désert, verts pâturages des montagnes, deltas fertiles, lacs salés ou lacs d'eau douce...

Le corps humain est constitué à 80 % d'eau. Par conséquent, l'eau est une ressource vitale pour l'homme et la plupart des êtres vivants. Les fontaines et les points d'eau furent les premiers lieux publics de l'Histoire. La quête de l'eau, le rapport des hommes à celle-ci à toujours fait l'objet d'une grande attention. Puits, bord de rivière sacrée, fontaines... ont toujours été dessinés remarquablement, avec beaucoup de soin, marquant ainsi un grand respect pour cette ressource essentielle. Leur emplacement, leur accès ont contribué à la forme des établissements humains, sociaux et culturels. L'eau est devenue un symbole à travers toute culture. Depuis moins d'un siècle, l'eau coule facilement de nos robinets et nous désacralisons sa valeur. La crise actuelle de l'eau ne nous permettra-t-elle de redonner une place juste et respectueuse de ce liquide précieux ?

La possession de l'eau est illusoire. L'eau coule et traverse les continents. L'eau s'infiltré dans le sol et traverse les régions loin sous nos pieds. À qui appartient-elle ? Qui peut prétendre la posséder ? Elle est un bien commun qu'il faut partager et respecter. Sa problématique est globale. La pollution se déplace avec l'eau, les mers et les nappes phréatiques. Sa rareté nous impose de l'économiser, de la collecter avec soin et prudence. Sa qualité dépend de notre attention à ne pas la polluer. Elle est essentielle pour chacun et pour notre voisin.

**L'eau, c'est la vie.
Elle coule, traverse, fuit,
nourrit, creuse les
profondeurs de la Terre.
Sa possession est
illusoire. Sa qualité est
essentielle. Sa distribution
est inégale. Sa rareté est
implacable.**



L'eau sur la Terre (Centre Scientifique et Technique de la Construction - Belgique). **1**



- 2** 1. Désert du Radjastan (Inde).
- 2. Fontaine Montgomery à Bruxelles (Belgique).
- 3. Ghat à Bénares sur le Gange (Inde).
- 4. Bassin carré à Hampi (Inde).

L'eau des grandes étendues tels les océans et les lacs s'évapore dans l'air, se condense en fines gouttelettes en suspension et forme les nuages. Ceux-ci transportent l'eau dans l'atmosphère et la précipite en pluie ou en neige sur les océans et les continents. Une partie de ces eaux ruisselle vers les cours d'eau et retourne vers les océans ou les lacs d'eau douce. Une autre partie de ces eaux, majeure, s'infiltré dans le sol où elle forme les nappes d'eau souterraine, étape de stockage par excellence dans le cycle hydrique, et se déverse *via* les sources avec un certain retard vers les cours d'eau, lacs et océans. Les plantes et animaux absorbent l'eau de surface ou contenue dans le sol pour leur croissance. Une partie de cette eau est restituée à l'atmosphère par la transpiration à travers les pores végétaux et animaux. L'énergie nécessaire pour faire circuler l'eau (mécanismes d'évaporation, de précipitation, de transpiration, de ruissellement, d'infiltration) est fournie par le soleil et la gravité de la Terre.

Des déséquilibres naturels peuvent apparaître dès que l'homme perturbe le cycle naturel de l'eau pour ses besoins. Une réflexion globale, ou une "gestion intégrale de l'eau" est indispensable afin d'en minimiser les impacts. Ruissellement et pollution sont les principaux perturbants du cycle naturel suite à l'urbanisation, au développement des industries... C'est au niveau de la **conception** même des villes, bâtiments, réseaux et infrastructures que devraient être menées ces réflexions.

1.- Ménager le cycle hydrique en réduisant les eaux de ruissellement permet de limiter érosions, inondations, assèchement des nappes, diminution des fonctions épuratives du sol, dilution des eaux usées et grossissement de la quantité des eaux usées à traiter...

Limiter le volume des eaux de ruissellement peut se faire de plusieurs manières suivant le contexte et les besoins :

- infiltrer les eaux de pluie propres dans le sol, en évitant le ruissellement en surface ;
- laisser l'eau s'évaporer *via* des bassins, toitures végétales, etc ;
- mettre les eaux de pluie à profit dans le bâtiment pour les usages où la qualité de cette eau convient, ou en la traitant adéquatement pour l'usage prévu ;
- au cas où un rejet serait inéluctable, retarder les eaux de pluies vers les égouts, par des bassins d'orage, des citernes d'eau de pluie, des bassins d'agrément, des toitures végétales. Ces moyens permettent de limiter les inondations en aval et permettent, suivant le cas, à une partie de l'eau de s'évaporer.

2.- Ménager le cycle hydrique en limitant la pollution permet de limiter l'asphyxie des eaux de surface, la pollution des mers et des nappes phréatiques, la perte de la biodiversité, et bien sûr d'obtenir en retour un eau de meilleure qualité. Limiter la pollution à la source est indispensable. Contrôler les eaux sales en aval en est le complément nécessaire.

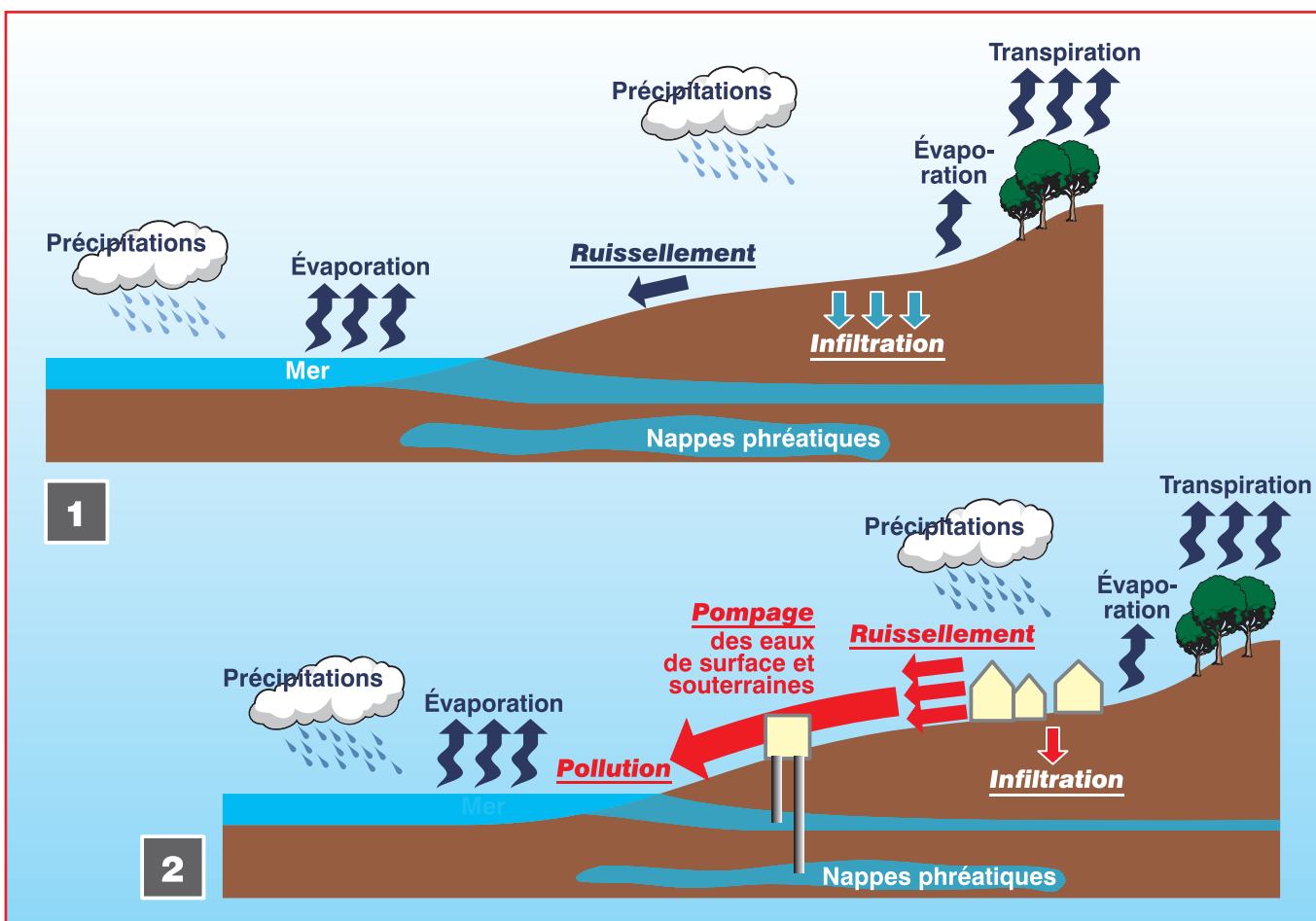
La qualité de toute eau doit être soigneusement analysée lors de son rejet dans le milieu naturel ou vers le réseau d'égouttage. Les sols, les mers ont une fonction épuratoire naturelle, mais cette fonction est limitée et variable. Il est important de la respecter et de l'aider si le volume des eaux sales est trop important ou si la pollution est trop importante.

Adapter le traitement d'épuration au type de pollution que l'eau a subi rend le traitement plus efficace, moins énergivore et l'eau sera de meilleure qualité en aval. Cela permet aussi de mieux recycler les eaux traitées. Il est important de séparer les eaux grises, des eaux noires, des eaux industrielles... afin de leur faire subir le traitement adéquat. Il faut éviter de diluer les eaux sales avec de l'eau de pluie, car le volume d'eau sale à traiter grossit inutilement.

Ménager le cycle hydrique naturel permet de limiter les déséquilibres naturels : il faut contrôler le ruissellement et la pollution des eaux.



L'eau est une ressource vitale. 1



2 Cycle hydrique naturel et cycle hydrique perturbé.

Économiser l'eau, de manière générale, permet de ménager les réserves des nappes phréatiques, de diminuer les coûts d'infrastructure, captage, transport et traitement de l'eau, et d'économiser de l'énergie. Cela permet de limiter les besoins de captage dans les eaux de surface qui sont généralement très polluées et lourdes à traiter, ou d'éviter de devoir dessaler et traiter les eaux de mer.

Économiser l'eau permet de diminuer la quantité d'eau à traiter à la sortie et de mieux la traiter également, avant de la laisser retourner dans la nature (sol ou rivière)

Économiser l'eau contribue à ménager son cycle naturel et indirectement à obtenir une eau de meilleure qualité.

Des moyens peuvent être appliqués pour économiser **l'eau en complément indispensable à une conception intégrée** des villes, bâtiments, réseaux et infrastructures sur base de la réflexion d'une "gestion intégrale de l'eau".

- Le comportement des utilisateurs est déterminant dans les économies d'eau, par son attention à ne pas gaspiller l'eau, par la manière de laver (vaisselle, lessive...) à la main ou en machine remplie, par le choix des savons et détergents écologiques, en préférant les douches plus économes en eau que les bains...
- Des mesures techniques peuvent également améliorer les économies d'eau. Réduire la pression d'eau dans les canalisations près du compteur ou au niveau des appareils. Utiliser des appareils économes en eau, robinets spéciaux, WC à chasse d'eau réduite, machines à laver économe en eau, etc.
- Diversifier la qualité de l'eau en fonction de ses besoins permet de limiter les traitements de l'eau à ce qui est nécessaire. L'eau potable de distribution est de trop bonne qualité pour une grande part des usages domestiques. Il y a lieu d'utiliser de l'eau recyclée ou de l'eau de pluie pour ces usages.

Pour information, voici quelques chiffres de consommation/besoins moyens en eau journalier :

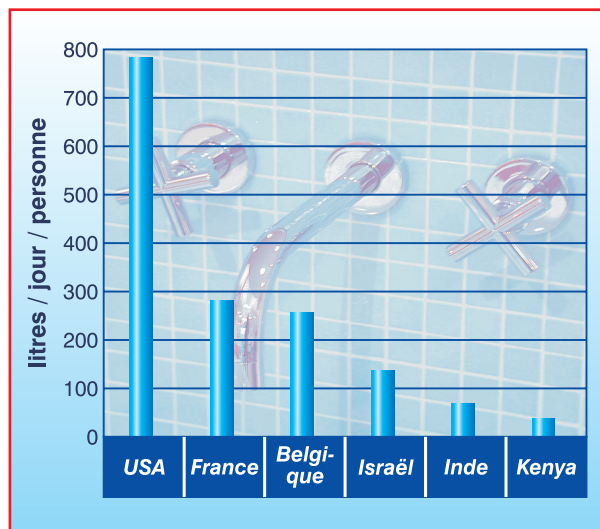
France : 109 litres par jour et par personne.
Belgique : 104 litres par jour et par personne.
Pays-bas : 142 litres par jour et par personne.
Allemagne : 137 litres par jour et par personne.
Suède : 195 litres par jour et par personne.
Kenya : 4 litres par jour et par personne.
(source : FAO - 1990)

Mélèze de 25 m de haut : 74 litres/jour
Hêtre de 35 m de haut : 137 litres/jour
Epicéa de 25 m de haut : 175 litres/jour
(source : Unité des Eaux et Forêt - UCL)

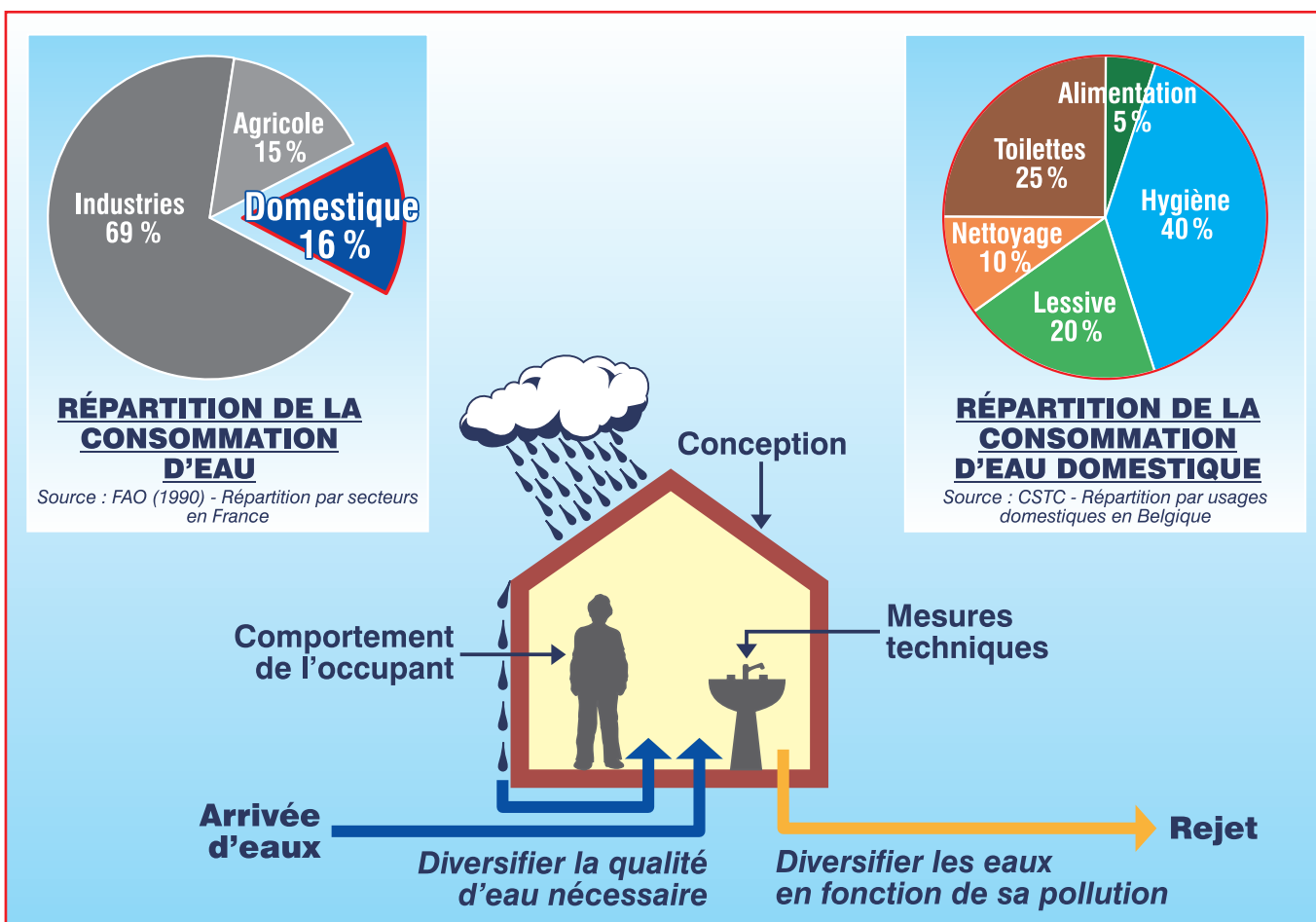
Voici quelques chiffres de quantité d'eau nécessaire à l'élaboration de certaines denrées :

1.500.000 litres pour 1 tonne de blé
4.500.000 litres pour 1 tonne de riz
34.000.000 litres pour 1 tonne de boeuf
(8.500 litres pour un steak de 250 grammes)
(source : Région Wallone)

Économiser l'eau permet de ménager les nappes phréatiques, de diminuer les coûts de captage, transport et traitement de l'eau, d'économiser de l'énergie, de moins polluer et par conséquent d'obtenir une eau de meilleure qualité.



Consommation domestique d'eau. 1



2 Répartition des consommations d'eau.

La dégradation progressive de la qualité des eaux, principalement due aux pollutions agricoles et aux rejets industriels divers, couplée à un prix moyen du m³ en constante augmentation, font de la récupération des eaux pluviales un procédé naturel, économique et complémentaire au réseau de distribution d'eau potable.

Les différentes utilisations de l'eau de pluie (figure 2)

- l'arrosage des espaces verts ;
- le lavage de la voiture et des sols (ménage) ;
- l'alimentation des retenues d'eau (étangs, mares artificielles...) ;
- l'alimentation des chasses d'eau ;
- l'alimentation de la machine à laver le linge ;
- l'alimentation des réseaux de chauffage et de climatisation...

Le stockage

L'eau de pluie, très souvent récupérée en toiture, est acheminée dans des cuves ou citernes de stockage, plus ou moins grandes, dont il existe deux types de modèles :

1. les citernes en béton, enterrées, qui ont l'avantage de reminéraliser naturellement l'eau de pluie, généralement douce et légèrement acide ;
2. les citernes en polyéthylène haute densité (PEHD) installées, en fonction des utilisations, soit à l'extérieur (figure 1), soit le plus souvent dans un local sombre, à l'abri de la chaleur ($t^{\circ} < 25^{\circ}\text{C}$) pour éviter un développement bactérien dans la citerne.

Le dimensionnement de la citerne est un facteur primordial. Il doit être pensé pour assurer un renouvellement rapide de l'eau stockée et dépend :

1. de la quantité d'eau à utiliser ;
2. de la surface du toit ;
3. de la localisation géographique de l'installation : au Sud, les pluies sont moins fréquentes qu'au Nord et plus intenses, ce qui impose un volume de stockage plus important pour pallier à d'éventuelles périodes sèches. Au Nord, les pluies sont régulières et peu intenses, le volume de stockage sera donc plus limité pour assurer un bon renouvellement de l'eau.

Le traitement

Le premier traitement est un filtrage grossier effectué avant l'entrée de l'eau dans la citerne. Il se fait le plus souvent dans la gouttière par un filtre collecteur et permet l'élimination des déchets organiques (feuilles, mousses, chenilles...) et inertes (cailloux...).

À la sortie de la citerne, et en fonction des différents usages que l'on veut faire de l'eau récupérée, il existe plusieurs niveaux de filtration : plus on s'approche d'une eau dite potable, plus le maillage des filtres doit être réduit (filtration sur sable, sur charbon actif) ; 1 à 9 microns par exemple pour une eau de lave-linge.

La distribution

Elle s'effectue le plus souvent grâce à une pompe (située de façon à ce que le niveau d'aspiration soit le plus bas possible) qui alimente soit un ballon pressurisé, soit directement les équipements.

La réglementation

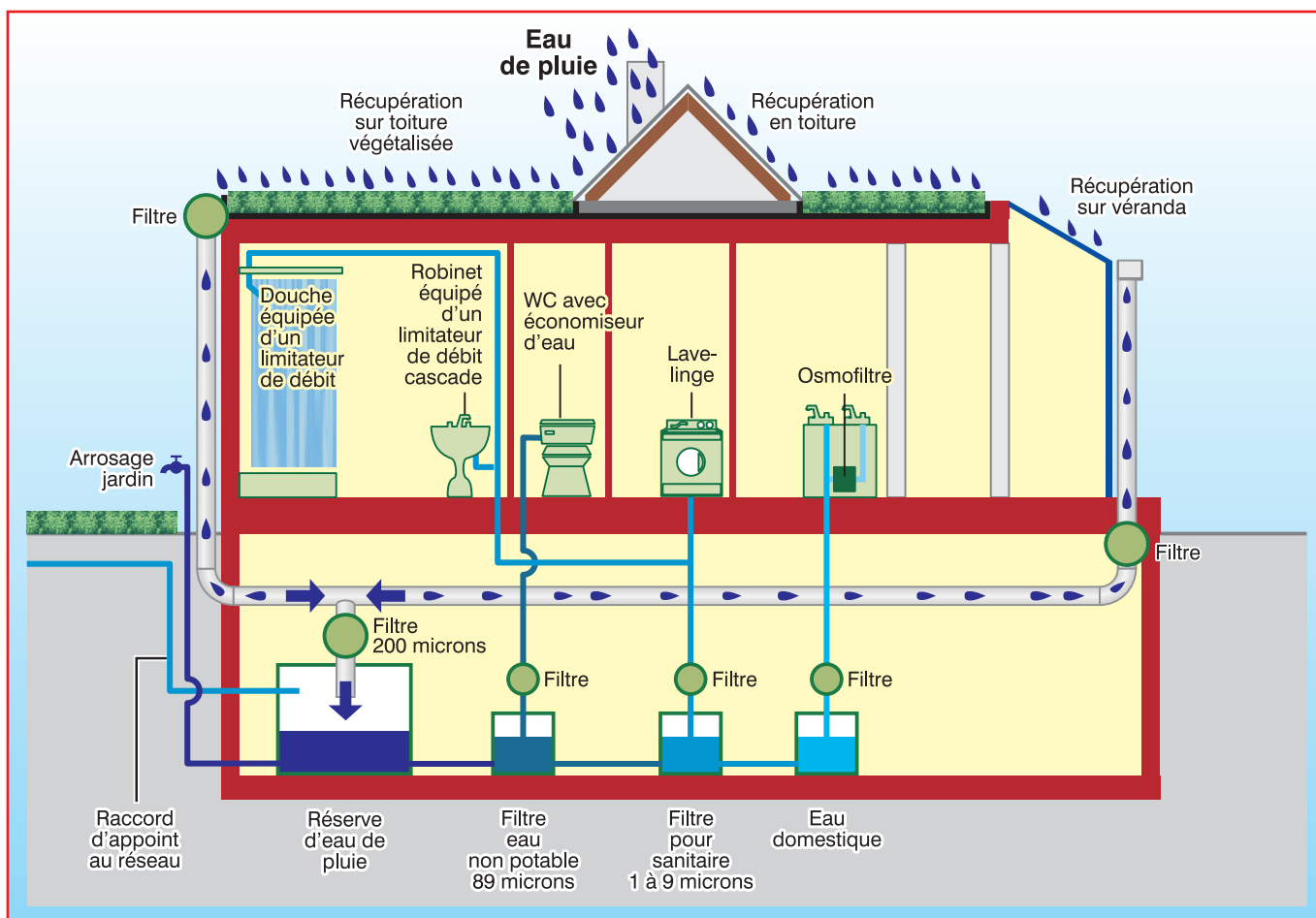
En France, et contrairement à d'autres pays européens comme la Suisse ou la Belgique, le CSHPF (Conseil supérieur d'hygiène publique de France) s'oppose à l'installation simultanée de réseaux de distribution d'eau potable et d'eau non potable (eau de pluie) à l'intérieur des bâtiments, sauf pour les systèmes de fonctionnement en circuit fermé.

Pour utiliser une eau pluviale, il convient de procéder impérativement à une identification et un marquage spécifique du réseau (plaques avec mention "eau non potable", rubans adhésifs) afin d'éviter toute confusion.

La récupération des eaux pluviales concerne tous les secteurs du bâtiment (individuel, collectif, tertiaire) et peut représenter une économie de plus de 60 % sur la consommation totale d'eau.



Citerne de récupération des eaux de pluie **1** pour arrosage des espaces verts.



2 La récupération et les différentes utilisations de l'eau de pluie.

Nous distinguons différents types de consommation d'eau et par conséquent différents types de pollution et de rejet d'eau polluée :

- les eaux de consommation (boisson, préparation des aliments, arrosage du jardin) qui ne présentent pas de rejet ;
- les eaux noires (eaux fécales des sanitaires) ;
- les eaux grises (eaux ménagères des lavabos, éviers, douches et baignoires) ;
- les eaux pluviales propres, ou sales suivant l'état des surfaces de ruissellement ;
- les eaux usées formées par les eaux grises et noires mélangées.

L'épuration naturelle et la pollution

Lors d'un rejet d'eaux usées domestiques dans une rivière ou un lac, divers processus sont mis en place naturellement afin de conserver un certain équilibre biologique, mais qui ont des conséquences parfois très néfastes pour l'environnement.

Les matières organiques des eaux usées constituent une nourriture pour les micro-organismes présents dans l'eau de rivière. Ceux-ci les décomposent en consommant l'oxygène dissout dans l'eau. Si la quantité de matière organique est trop importante à digérer pour le milieu, la demande en oxygène est très élevée et peut conduire à l'**asphyxie** des eaux et à une modification profonde de l'écosystème (mort de certaines espèces vivant dans l'eau tels les poissons, certains végétaux...).

Cette biodégradation produit aussi des déchets sous forme de sels minéraux dissous : entre autre les nitrates et les phosphates qui permettent la croissance des algues et mousses. À nouveau, si la quantité de ces déchets est trop importante, ces végétaux se multiplient de façon exubérante, conduisent à l'**eutrophisation** de la rivière et accentuent le problème d'asphyxie de l'eau.

L'épuration artificielle

Les grands principes déjà développés dans les précédentes fiches restent d'application.

À la source des pollutions :

- consommer le moins possible d'eau revient à rejeter moins d'eau sale !
- polluer le moins possible, en ne rejetant dans l'eau que des matières organiques rapidement biodégradables et en quantités minimales, revient à diminuer les efforts d'épuration nécessaires.

Gestion des rejets :

- tant que possible, ne pas diluer les eaux usées par les eaux de pluies propres afin de ne pas augmenter inutilement le volume d'eau à épurer ;
- si possible, séparer les différents types d'eau sales pour leur faire subir un traitement adéquat et efficace.

Les réglementations en vigueur, l'existence d'infrastructures d'épuration locales ou régionales, ou un choix personnel conditionnent le choix d'une station d'épuration individuelle partielle, totale ou collective.

Les choix techniques doivent être faits suivant le contexte existant (place disponible, pente de terrain nécessaire), l'envergure des installations, leur efficacité, leur consommation d'énergie, leur bilan CO₂, les réglementations, etc.

Classiquement, l'**épuration** se décompose en plusieurs phases :

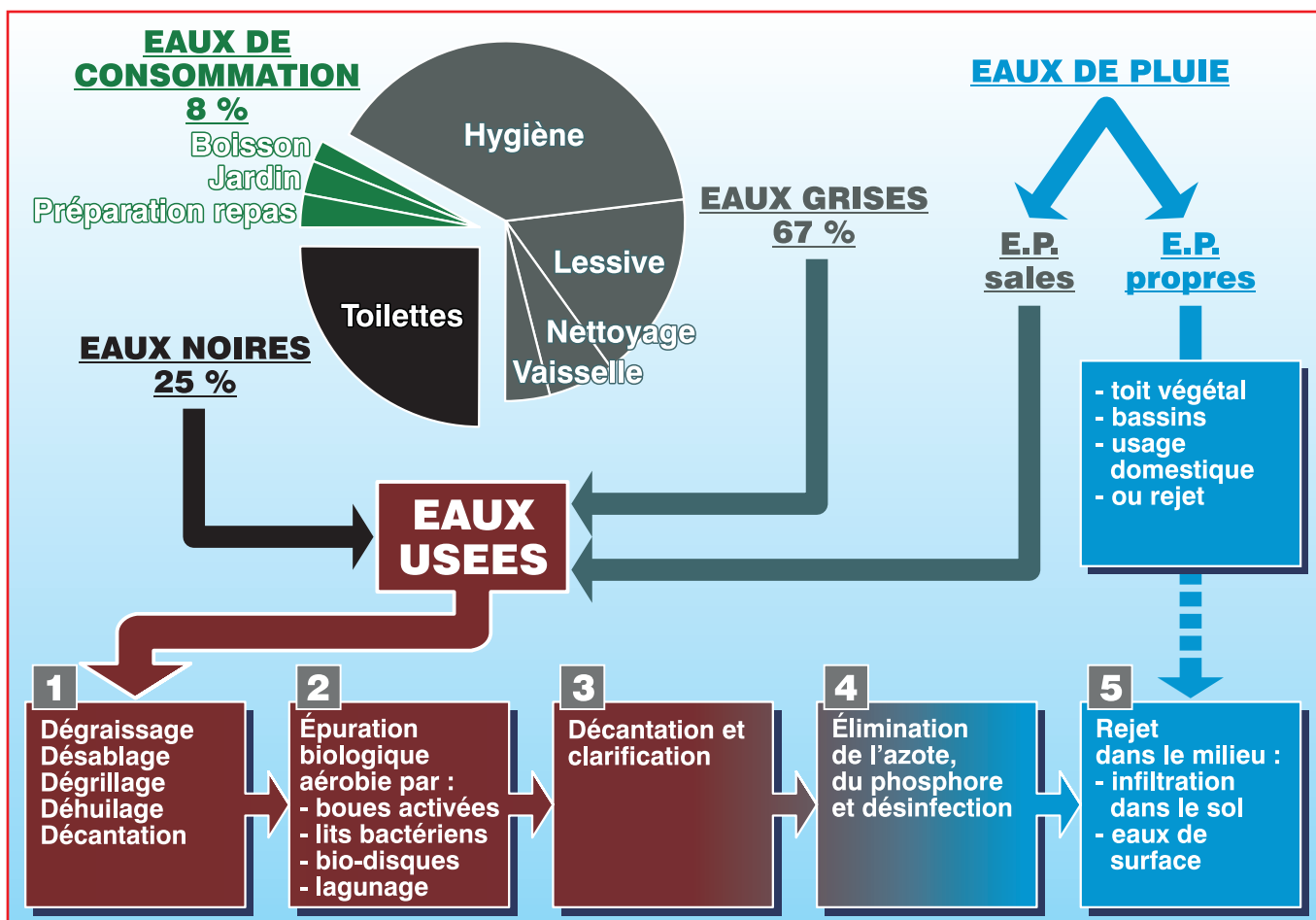
1. Un prétraitement qui élimine les matières flottantes, les sables, graisses ou huiles et une décantation primaire qui sédimente les matières en suspension.
2. L'épuration biologique aérobie qui permet la décomposition des matières organiques polluantes par des micro-organismes consommant l'oxygène dissout : techniques dites des boues activées, ou par lits bactériens, ou par bio disques, ou par lagunage.
3. Dans le cas de la technique dite des boues activées, une décantation secondaire permet de récupérer les micro-organismes lessivés (décantation des floccs de micro-organismes). Ces boues microbiennes sont recyclées en phase 3. Clarification des eaux en surface.
4. L'élimination biologique et/ou chimique de certains composants tels l'azote et le phosphore. Désinfection par traitement physico-chimique.
5. Rejet dans le milieu vers une voie d'eau (rivière, lac ou étang) ou dans le sol via un système de sous-épandage..

L'**épuration individuelle domestique**, quant à elle, se fait en différentes étapes légèrement différentes de l'épuration collective en raison de son moindre effort d'entretien, moindre consommation d'énergie, ses moindres nuisances olfactives et sonores, sa meilleure performance et adaptabilité aux variations de débits, et surtout plus adapté aux types de pollution à traiter.

Consommer moins d'eau pour rejeter moins d'eau polluée. Polluer moins en quantité et en qualité. Ne pas diluer les eaux usées avec l'eau de pluie propre. Séparer les types d'eaux sales pour mieux les traiter.



Station d'épuration de Wegnez **1**
(Belgique).



2 Les différents rejets d'eau et les étapes d'épuration des eaux usées.

La gestion des déchets d'activités vise à mettre en place les moyens nécessaires pour maîtriser la production et organiser l'évacuation des déchets. Elle se traduit par :

- une conception des dépôts de déchets d'activités adaptée aux modes de collecte actuels et futurs probables ;
- une gestion différenciée des déchets d'activités, adaptée au mode de collecte actuel.

Tout comme les déchets de construction et de démolition, les déchets d'activités sont également concernés par les nouvelles réglementations qui doivent entrer prochainement en vigueur pour mettre en application la directive européenne 91/156/EC du 18 mars 1991. Rappelons que la réduction de la production des déchets a été considérée par les Nations unies lors de la conférence de Kyoto comme l'un des objectifs prioritaires, et que l'Union européenne a inscrit le recyclage des déchets parmi les 4 priorités du plan d'actions 2001-2010.

Depuis plusieurs années, les collectivités locales se sont préparées progressivement à leurs nouvelles responsabilités en matière de gestion des déchets et ont organisé des filières de collecte et de valorisation. En fonction des particularités locales et du type de collecte et de traitement des déchets ménagers, les communes européennes proposent à leurs habitants différents modes de gestion de leurs déchets ménagers :

- un ramassage sélectif des déchets ménagers ;
- des points d'apport volontaire ;
- une ou plusieurs déchetteries.

Il convient toutefois de rappeler que la gestion des déchets passe non seulement par la réduction de la production de déchets mais aussi par un tri à la source des déchets. L'ensemble de ces mesures devrait permettre de réduire le dépôt en centre de stockage aux seuls déchets ultimes en privilégiant les filières de valorisation de déchets :

- valorisation organique par le compostage (traitement aérobie) ou par la méthanisation (traitement anaérobie) ;
- valorisation énergétique par l'incinération pour récupérer le contenu énergétique des produits et réduire au maximum le volume des déchets ;
- valorisation des matières des déchets recyclables (papiers-cartons, verre, PET, métaux...).

Si la gestion des déchets ménagers concerne davantage les usagers en phase d'exploitation du bâtiment, elle doit être prévue en amont par les architectes dès l'organisation et la conception des espaces en fonction du type de collecte adopté localement.

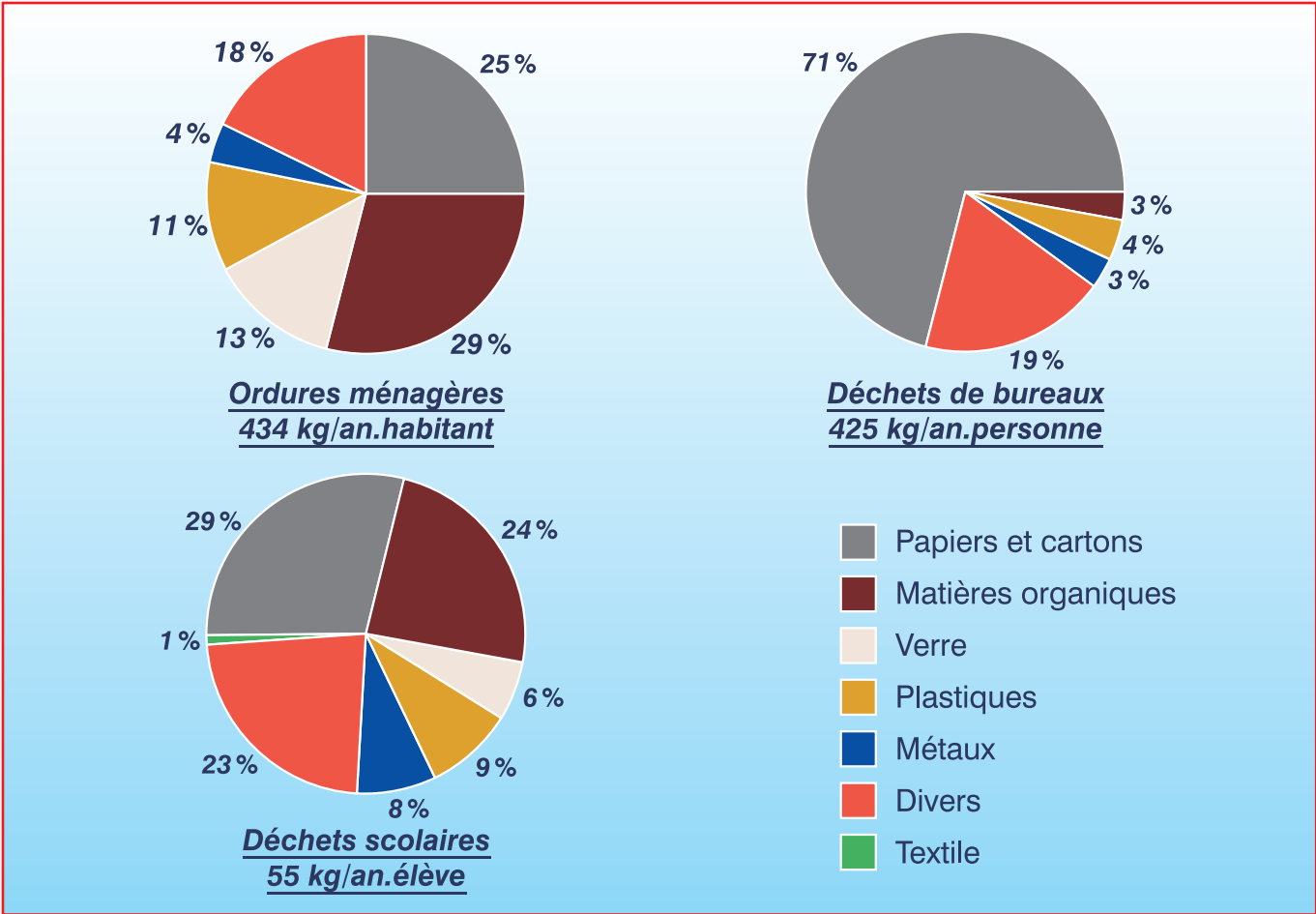
Le rôle de l'architecte consiste donc à organiser et à faciliter la collecte sélective au sein même du bâtiment en prévoyant l'emplacement nécessaire pour plusieurs "poubelles" ou "containers" bien distincts (figure 1). Leur emplacement doit répondre à des règles d'hygiène spécifiques. Le local à déchets doit ainsi répondre aux conditions suivantes :

- être orienté autant que possible au nord pour éviter les surchauffes d'été et donc l'accélération de la décomposition des matières organiques provoquant des odeurs désagréables ;
- être suffisamment ventilé ;
- être situé à proximité de l'endroit fixé pour l'enlèvement des déchets ménagers ;
- disposer d'un point d'eau et d'une évacuation pour faciliter le nettoyage du local ;
- prévoir des parois et une porte résistantes au feu en cas d'incendie spontané.

Plus de 350 kg de déchets ménagers sont produits en Europe par personne et par an, soit environ 1,5 tonne pour une famille de 4 personnes.



1 Aménagement de poubelles sélectives dans un meuble de cuisine (PUCA - Plan Urbanisme Construction Architecture).



2 Composition en masse des déchets ménagers, de bureaux et scolaires en France (ADEME).

Une démarche de développement durable conduit progressivement les architectes et les ingénieurs à concevoir leurs projets en envisageant le plus en amont possible les actions qui seront entreprises sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment.

Dans ce contexte, la prise en compte des opérations d'entretien et de maintenance au cours des phases de conception apparaît primordiale pour favoriser la durabilité générale du bâtiment, assurer une pérennité optimale des systèmes constructifs et techniques, garantir la fiabilité des prestations de services offertes par le bâtiment et ses équipements, répondre à l'évolution des exigences en matière de sécurité ou de confort, maintenir la valeur vénale du bâtiment...

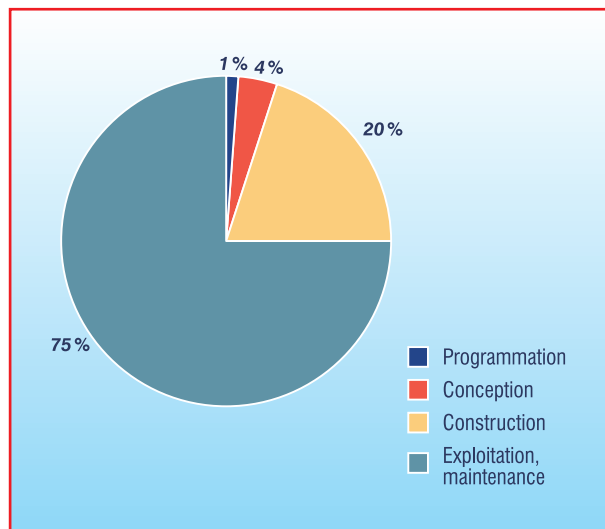
Il faut savoir que les coûts de conception et de construction représentent en général pour des immeubles tertiaires seulement 15 à 20 % du coût total du bâtiment au cours de sa vie, l'exploitation-maintenance représentant à elles seules plus de 80 %.

Si la maintenance d'un bâtiment concerne essentiellement la phase d'exploitation et donc les gestionnaires (sociétés immobilières, service maintenance d'une collectivité...), c'est pourtant dès la conception du projet, lors du choix des matériaux et des équipements, que l'équipe de maîtrise d'œuvre a la possibilité d'optimiser le plus efficacement les opérations d'entretien ou de maintenance futures.

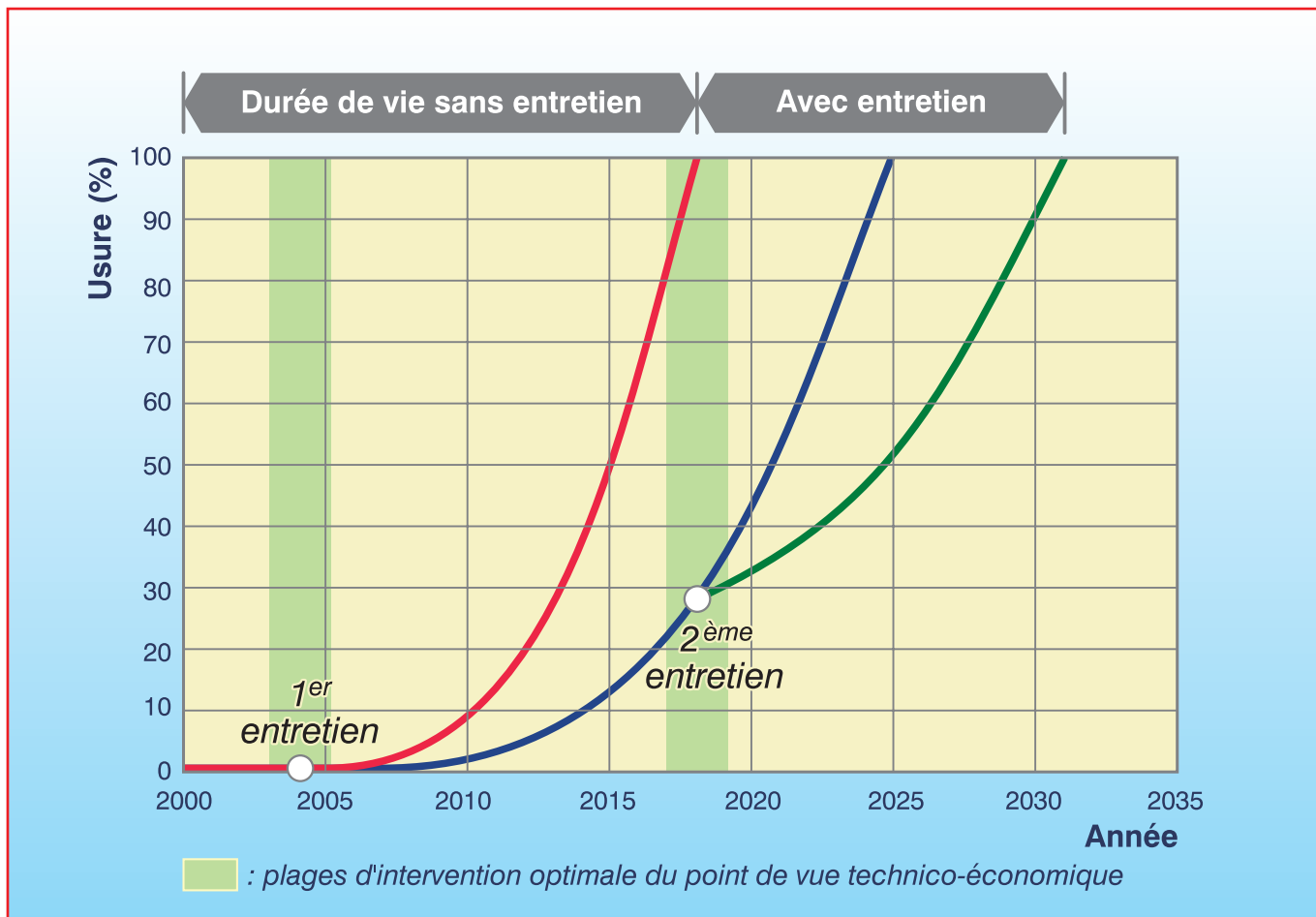
Toutefois, s'il apparaît assez simple de réaliser un diagnostic global de l'état d'un bâtiment et de ses installations pour en établir un planning d'entretien, prévoir la manière dont les différents éléments du futur bâtiment vont vieillir (en fonction de leur situation, de leur exposition au climat, des agressions qu'ils peuvent subir, des dommages causés par une pose défectueuse...) constitue encore aujourd'hui une réelle difficulté pour les concepteurs. Compte tenu des incertitudes sur le comportement général du bâtiment, sur la manière dont il sera construit, occupé, géré et entretenu, la planification des opérations de maintenance peut varier de manière importante. S'il reste difficile d'établir avec précision un plan de maintenance et donc d'établir un calendrier général de leurs futurs désordres du type "carnet d'entretien", plusieurs stratégies simples de prévention s'offrent aux concepteurs pour faciliter les opérations de maintenance :

- **accessibilité** : toutes les installations techniques, gaines techniques, réseaux de distribution et d'évacuation des équipements sensibles devront être facilement accessibles par le personnel de maintenance. Le flux des personnes sera clairement différencié avec les occupants habituels, ceci pour permettre également d'isoler certaines zones d'interventions temporaires au sein du bâtiment (pour des raisons de sécurité ou de confort des usagers). D'une manière générale, l'implantation des locaux techniques au sein du bâtiment devra permettre d'assurer une intervention rapide des services de maintenance tout en préservant le confort et la sécurité des occupants ;
- **durabilité** : tous les matériaux et équipements techniques seront choisis en fonction de leur fiabilité, de leur robustesse et de leur longévité. De plus, les équipements pourront facilement être entretenus par des entreprises locales pour garantir la rapidité d'intervention. Ce principe conditionne le taux d'indisponibilité des équipements et le coût ainsi que la fréquence des opérations de maintenance ;
- **démontabilité** : le concept technique ou constructif devra permettre de démonter facilement les différents composants, principalement ceux dont la durée de vie est différente ;
- **information du gestionnaire et des usagers** : pour sensibiliser le gestionnaire et les usagers, ceux-ci seront régulièrement informés des consommations du bâtiment et des interventions à réaliser sur chaque élément constructif ou technique du bâtiment.

La maintenance est l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bâtiment dans un état, ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.



Coût global d'un bâtiment tertiaire **1** (Le Moniteur).



2 Courbe d'usure moyenne d'un châssis aluminium à rupture de pont thermique (d'après GEPAT'IMMO).

Prendre en compte les effets environnementaux et sanitaires des produits et procédés de maintenance au cours de la conception et de la réalisation d'un bâtiment, se fait principalement aux étapes de finalisation du projet puis au cours du chantier et enfin lors de la livraison du bâtiment.

Cependant l'architecte commence à induire, souvent sans le savoir, des sources potentielles de pollution par la maintenance et surtout l'entretien quand il choisit des matériaux et notamment les revêtements des sols ou de murs.

Ceux-ci ne doivent pas être source de pollution ni dans leur état initial (mise en œuvre) ni par leur dégradation. Disposer des analyses de cycle de vie des produits (ACV) permet d'éclairer les choix grâce aux données sur les produits d'entretien : produits nettoyants, cires, produits anti-parasitaires.

Les produits d'entretien pouvant représenter une source polluante notamment pour les personnes les plus fragiles (par exemple pour des crèches, bâtiments scolaires, maisons de retraite), un critère de choix orientera le concepteur vers les revêtements de parois ou les parois nues qui ne nécessitent pas de produits d'entretien nocifs :

- non ou peu polluants (lessivage à l'eau par exemple) pour les locaux de vie ;
- non ou moins nocifs pour la santé des agents de maintenance et des usagers (détergents sans solvants, ni irritants, ni toxiques) pour tout autre local.

Les choix des équipements, des matériaux et des produits concernés sont principalement :

- les façades (nettoyage courant et anti-graffitis ne demandant ni ponçage, ni solvants) ;
- les revêtements intérieurs (remplacement d'un élément) ;
- les équipements techniques (remplacement et nettoyage des filtres) ;
- les fenêtres, menuiseries, protections solaires (peintures, joints) ;
- les isolants (confinement des fibres et emplacement vis-à-vis des percements pour la décoration) ;
- les cloisons intérieures et plafonds (fibres contenues dans les cloisons acoustiques) ;
- les peintures (pas de ponçage préalable à la réfection).

Alors que les choix sont effectués dans ce sens, Il faut être strict avec les entreprises qui proposeraient des matériaux apparemment "équivalents au plan fonctionnel et esthétique", mais dont l'entretien nécessiterait des procédés de maintenance polluants.

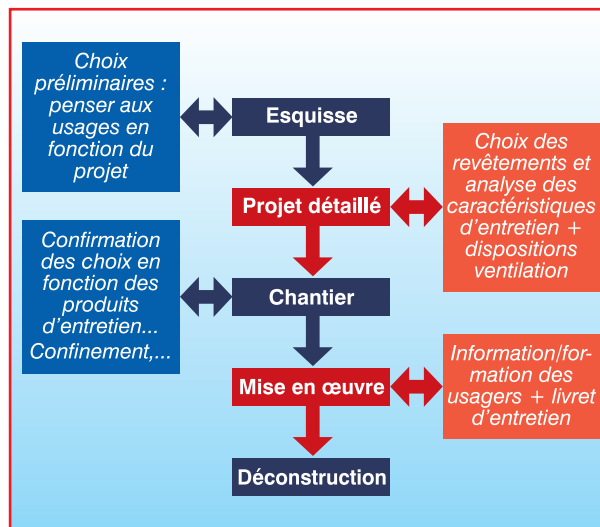
Les locaux techniques bien ventilés, ou avec la possibilité de sur ventiler lors des opérations de maintenance, seront conçus avec accès et espace suffisant autour des équipements pour permettre un entretien facile, en particulier pour les manipulations de produits toxiques où l'utilisation de produits nocifs pour la santé (solvants...).

Les caissons de ventilation contenant des fibres de laine minérale (même confinées) doivent être agencés de manière à éviter le défibrage lors des manipulations.

Le rôle de l'architecte consiste aussi à réaliser ou mettre en œuvre avec les différentes compétences de son équipe de bureaux d'études techniques et selon le type de bâtiment :

- une action de sensibilisation auprès du gestionnaire et le cas échéant des usagers ;
- une action de formation du personnel d'entretien ;
- un guide de maintenance et un livret d'entretien qui donneront la liste des produits d'entretien courant et les fréquences d'intervention.

**Le choix de matériaux
et de revêtement
nettoyables à l'eau
permet de limiter la
pollution engendrée
par l'entretien et
la maintenance.**



1 Les étapes de prise en compte de l'entretien et de la maintenance.

Monoxyde de carbone ☞	Examen des générateurs, conduits d'évacuation et moyens de ventilation
Fumée de tabac ☞	Séparation des zones fumeurs, modification des systèmes aérauliques si nécessaire (suite modification des agencements)
Radon ☞	Veiller à la permanence des dispositifs de ventilation
Amiante ☞	Concerne la réhabilitation : dispositions réglementaires à prendre
Fibres minérales artificielles ☞	Les agents de maintenance doivent disposer du matériel de protection individuel
Plomb ☞	Concerne la réhabilitation : - peintures : à retirer avec précaution : ni brûlage, ni ponçage - tuyaux : à changer si alimentation
Moisissures ☞	Assurer un bon fonctionnement de la ventilation
Composés organiques volatils et formaldéhyde ☞	Sur-ventilation des locaux lors des opérations de maintenance
Température et humidité ☞	Vérification régulière du fonctionnement de la ventilation, des systèmes de chauffage et de rafraîchissement
Poussières ☞	Nettoyage + remplacement des revêtements usagés + maintenance des systèmes de ventilation
Acariens ☞	Remplacement à date fixe des revêtements usagés (facile à nettoyer)
Légionelles ☞	Plan de gestion et désinfection périodique
Bruit ☞	Vérification des niveaux sonores
Polluants de l'air extérieur ☞	Vérifications régulières des dispositifs de filtration
Champs électromagnétiques ☞	Vérifications régulières de la conformité des installations électriques et électroniques

2 Opérations de maintenance, comment éviter les pollutions.

La sensation de confort thermique est l'expression du bien-être d'un individu résultant d'échanges hygrothermiques équilibrés avec son environnement.

La température de confort est la moyenne entre la température de l'air et la température des parois, pour une vitesse de l'air inférieure à 0,2 m/s et une hygrométrie comprise entre 30 et 70 %.

La température du corps humain est pratiquement constante quelles que soient les conditions d'ambiance ou l'activité physique. Elle oscille autour de 36,7°C. Pour maintenir cette température, le corps humain dispose d'un système de production de chaleur et d'un système de thermorégulation.

La sensation de confort thermique dépend de 7 paramètres :

- le métabolisme représentant la production de chaleur interne du corps humain nécessaire pour le maintenir à une température constante de 36,7°C, soit environ 80 W au repos ;
- l'habillement représentant la résistance thermique aux échanges de chaleur qui ont lieu entre la surface de la peau et l'ambiance ;
- la température de surface du corps ou température de la peau variant en fonction du métabolisme et de l'habillement ;
- la température ambiante concernant les échanges par convection avec l'air ambiant ;
- la température moyenne de surface des parois concernant les échanges par rayonnement avec les parois, proportionnellement à leurs superficies ;
- l'humidité relative concernant les échanges thermiques par évaporation à la surface de la peau ;
- la vitesse de l'air influençant les échanges thermiques par convection et par transpiration.

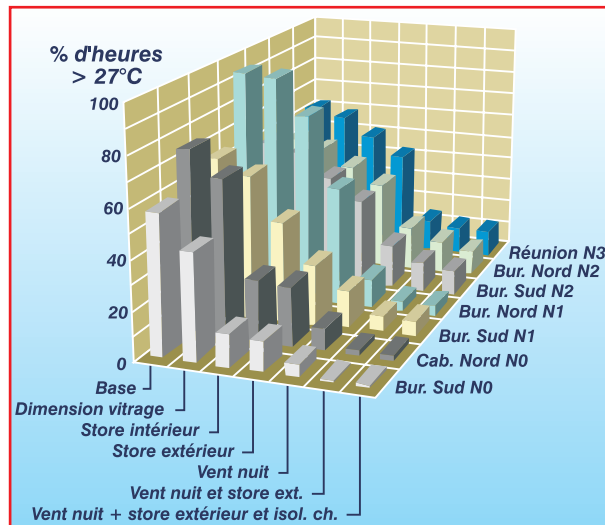
Essentiellement, comme les échanges thermiques s'effectuent à 50 % par convection et à 50 % par rayonnement, la température de confort, appelée aussi température résultante sèche, (figure 2) résulte de la moyenne de la température ambiante de l'air et de la température moyenne de surface des parois, pour une vitesse de l'air inférieure à 0,2 m/s et pour une hygrométrie comprise entre 30 et 70 %.

Le management environnemental a surtout permis de mettre l'accent sur les problématiques de confort thermique d'été pour réduire notamment les besoins de climatisation. C'est ainsi que l'équipe de maîtrise d'œuvre fournit de nombreux efforts pour :

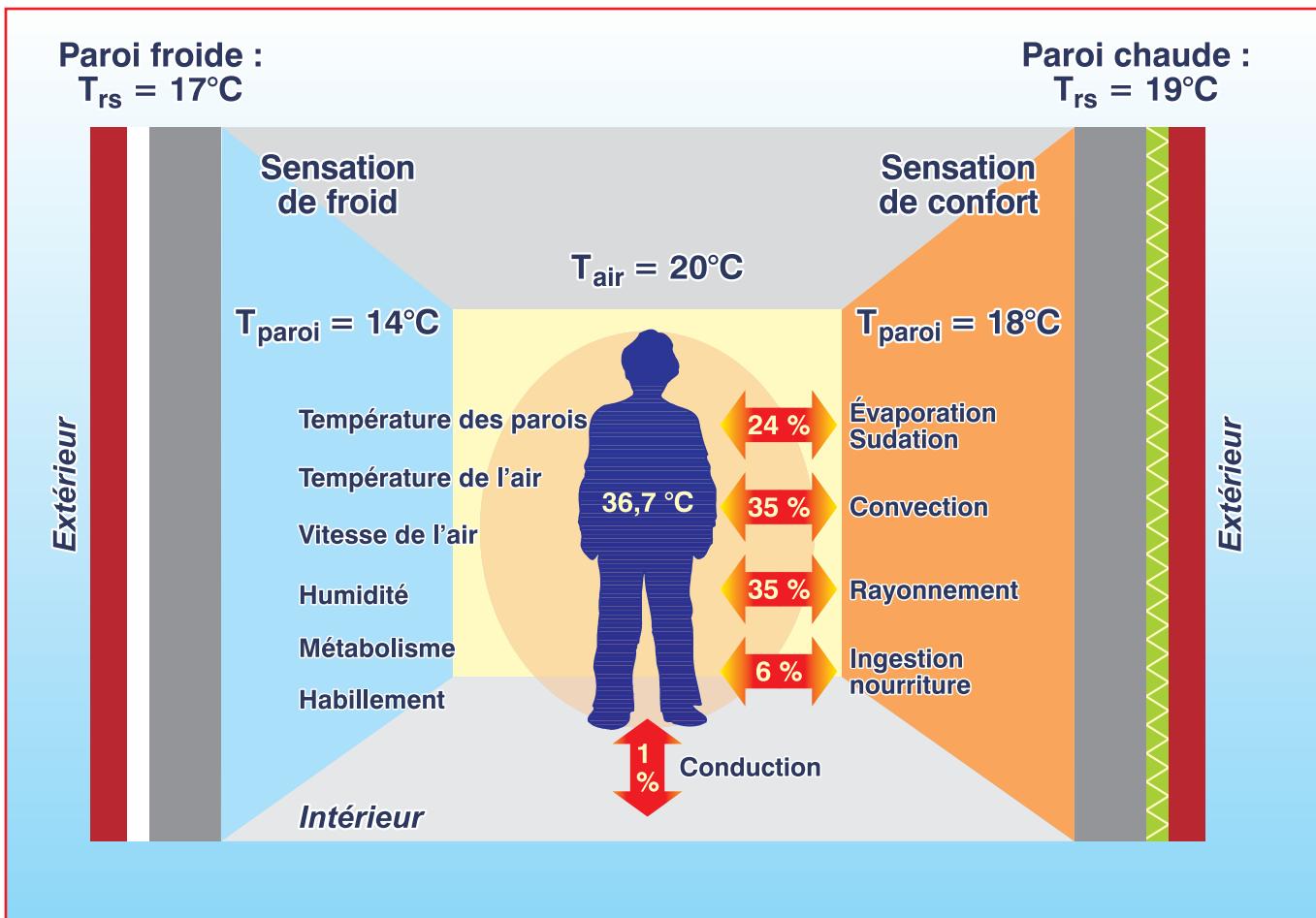
- protéger le bâtiment, en particulier ses ouvertures, du rayonnement solaire d'été par des protections solaires mobiles (stores extérieurs, screen...) ou fixes (végétation, auvents...) ou en isolant suffisamment les parois (surtout dans les climats chauds) pour empêcher la chaleur de s'accumuler dans la masse ;
- minimiser les apports internes provenant des équipements électriques (éclairage artificiel, ordinateurs...);
- dissiper la chaleur en excès par une ventilation nocturne forcée (plus de 7 volumes/heure) ou par des cheminées solaires exploitant les gradients de température et l'effet de cheminée ;
- refroidir naturellement le milieu ambiant par la mise en place de plans d'eau, de fontaines, d'éléments végétaux...

L'ensemble de ces mesures peut faire l'objet d'analyses comparatives technico-économiques par des simulations thermiques dynamiques réalisées avec des logiciels informatiques telles que TRNSYS, DO2, COMFIE, PAPTER, LESOCOOL... Le résultat de ces calculs peut permettre d'aider un maître d'œuvre ou un maître d'ouvrage à optimiser ses choix tout au long de la conception du bâtiment en fonction de l'usage envisagé (figure 1).

La sensation de confort thermique est l'expression du bien-être d'un individu résultant d'échanges hygrothermiques équilibrés avec son environnement.



Calcul du taux d'inconfort thermique pour les bureaux HQE de Trivalor à Chambéry (Trivalor-Gefosat). **1**



2 Échanges thermiques entre l'homme et son environnement (Architecture et Climat).

En mettant l'accent sur le confort d'été et les apports d'éclairage naturel, les protections solaires mobiles ou fixes se sont largement développées dans l'architecture.

Complément indispensable de la fenêtre, les protections solaires recouvrent de nombreux intérêts pour le confort des usagers :

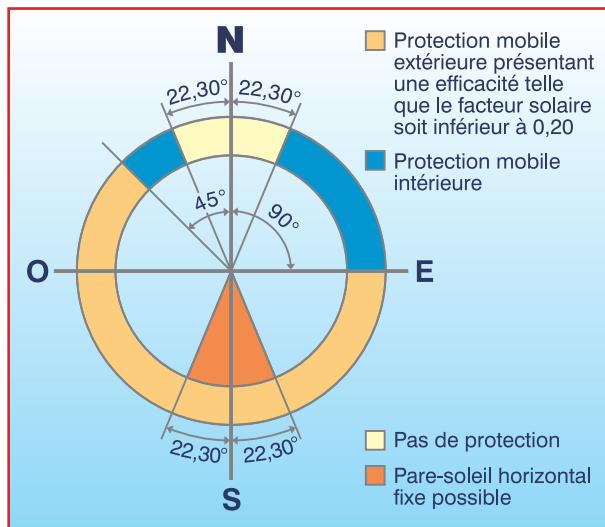
- réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Dans ce cas, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre ;
- améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres. Cette propriété sera principalement recherchée durant les nuits d'hiver. Certaines protections peuvent réduire les déperditions thermiques des fenêtres de 25 à 40 % ;
- contrôler l'éblouissement. Un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible. Ce phénomène est aussi important pour des fenêtres orientées au sud durant la saison chaude que lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin, pour les fenêtres orientées à l'est, le soir, pour les fenêtres orientées à l'ouest, ou encore au sud en hiver. De même, dans les locaux orientés au nord, la vision directe d'un ciel trop lumineux peut devenir gênante et nécessiter une protection. Contrairement au contrôle solaire, la luminosité peut être contrôlée par un système de protection solaire installé indifféremment à l'intérieur et à l'extérieur ;
- assurer l'intimité entre l'intérieur et l'extérieur, surtout en milieu urbain et le soir.

Il existe essentiellement trois types de protections solaires dont l'efficacité dépend de l'orientation de la façade (figure 1) :

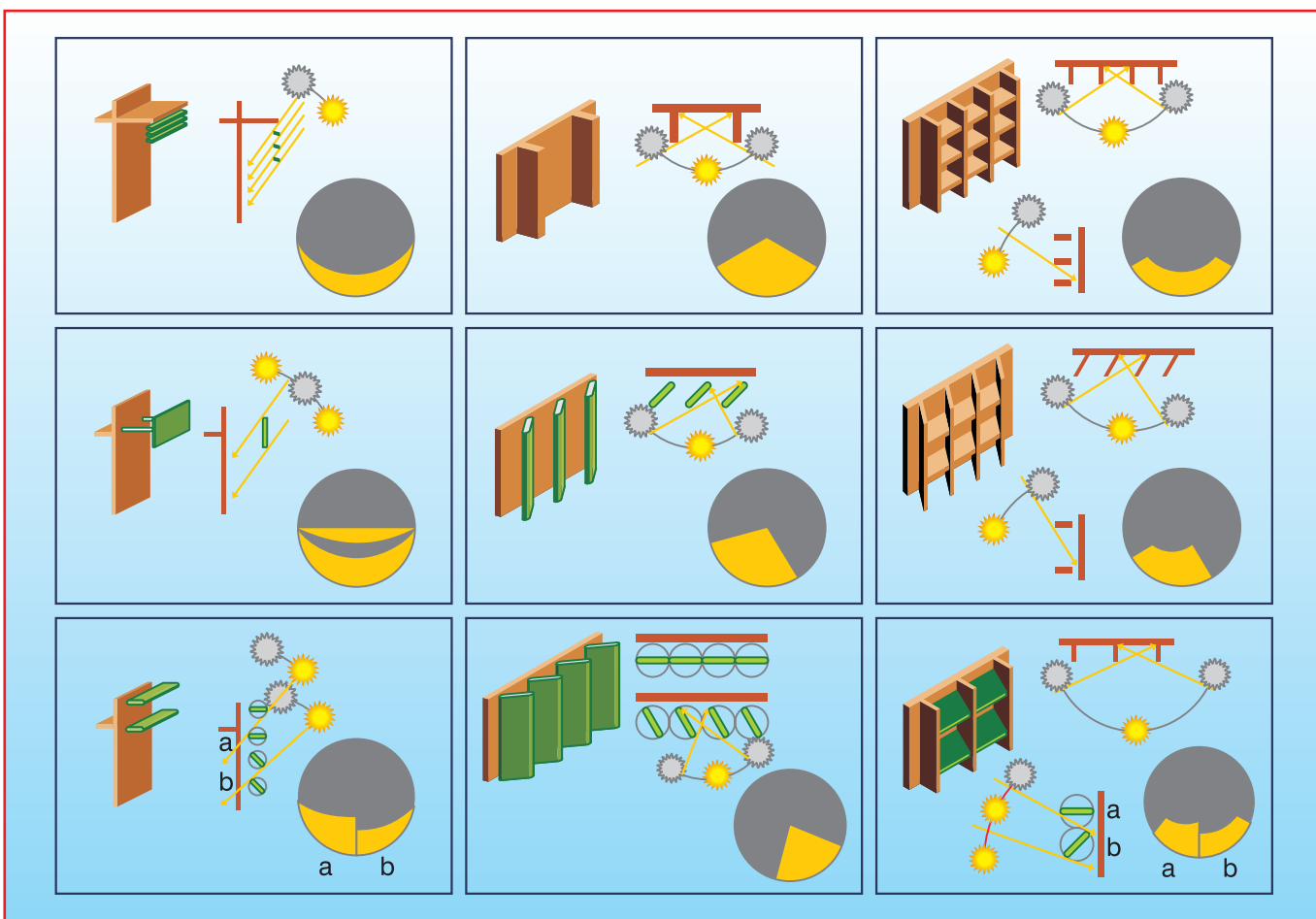
- les protections solaires fixes (souvent utilisées horizontalement comme élément architectural). Il s'agit des brises-soleils (figure 2) ;
- les protections solaires mobiles extérieures. Il s'agit des "screen" perforés ou des stores aluminium à lames empilables et orientables. Ces protections solaires peuvent être motorisées et couplées à des appareils de mesure de l'ensoleillement pour augmenter leur efficacité ;
- les protections solaires végétales. Il s'agit notamment des arbres à feuilles caduques qui procurent un ombrage naturel saisonnier. En été, ils jouent le rôle de protections solaires. En hiver, le feuillage disparu, le bâtiment peut bénéficier de l'ensoleillement nécessaire pour réduire la consommation de chauffage.

Ces protections solaires sont souvent coûteuses. Aussi, il convient dès les premières esquisses d'implanter aussi convenablement que possible la future construction. À titre d'exemple, un immeuble dont les bureaux seraient orientés à l'est et à l'ouest devrait être impérativement équipé de protections solaires mobiles motorisées. Un simple brise-soleil aurait pu suffire si les locaux avaient été orientés au nord et au sud. Il est bien souvent plus facile de gérer l'ensoleillement au sud, car le soleil se trouve dans sa position la plus haute. À l'est ou à l'ouest, le soleil est bas, et rentre profondément dans le bâtiment, générant ainsi des risques d'éblouissement ou de surchauffe dès le matin ou en fin de journée.

La pose de protections solaires selon l'orientation du bâtiment permet de limiter les risques de surchauffes ou d'éblouissement et d'assurer l'intimité des habitants.



1 Protections solaires fixes ou mobiles (d'après E. Dufrasnes).



2 Exemples de protections solaires fixes (d'après V. Olgyay).

Avant d'aborder ce volet sur le confort acoustique, procédons à quelques brefs rappels sur l'acoustique.

Le son est la sensation auditive engendrée par la vibration d'un corps solide qui fait fluctuer périodiquement la pression de l'air au niveau du tympan de l'oreille. Cette variation de la pression se représente sous forme d'une onde sinusoïdale dont l'amplitude caractérise le niveau de pression acoustique et donc le niveau sonore. Cette onde se propage dans toutes les directions à partir de la source selon une vitesse qui dépend du milieu (vide = 0 m/s, air = 340 m/s, eau = 1 450 m/s, acier = 5 000 m/s...). Le son, ou le bruit, est caractérisé par son mode de propagation :

- les bruits d'impacts où le son se propage dans les corps durs ;
- les bruits aériens où le son se propage dans l'air.

Selon sa fréquence, l'oreille humaine perçoit des sons graves (fréquence longue) ou aigus (fréquence courte) sur une plage comprise entre 20 et 20 000 Hertz. La sensibilité de l'oreille humaine se situe dans la zone de fréquence comprise entre 20 et 16 000 Hertz.

L'acoustique est la science qui étudie les phénomènes de perturbation de l'onde sonore lorsqu'elle rencontre un obstacle qui la dévie, la dénature, l'amplifie ou l'absorbe. Elle traite essentiellement les deux phénomènes suivants :

- l'isolation acoustique dont le but est de protéger les occupants du bruit généré à l'extérieur, et les voisins du bruit généré à l'intérieur ;
- la correction acoustique dont le but est de corriger de façon harmonieuse les réverbérations du son dans le local.

La pression acoustique utilise une échelle difficilement utilisable, allant de 0,00002 à 20 Pascal. Pour pouvoir exprimer de manière plus aisée la pression acoustique, les acousticiens adoptèrent la notion logarithmique de décibel pour identifier le niveau sonore. Ainsi, 0,00002 Pascal correspond à 0 dB et 20 Pa à 120 dB.

Pour caractériser les niveaux de bruit, on traduit ensuite les unités physiques exprimées en dB en unités physiologiques dB(A) exprimées selon une pondération des niveaux sonores pour chaque bande d'octave. Le décibel est en effet une unité d'intensité physique qui ne correspond pas tout à fait à la sensation auditive perçue par notre oreille. Des courbes d'iso-sonies, d'égale sensation, ont été définies en fonction de la fréquence.

Lors de la mesure d'un bruit, des filtres sont adaptés afin que l'indication soit fidèle au ressenti de l'oreille humaine. Il existe 3 niveaux de pondération :

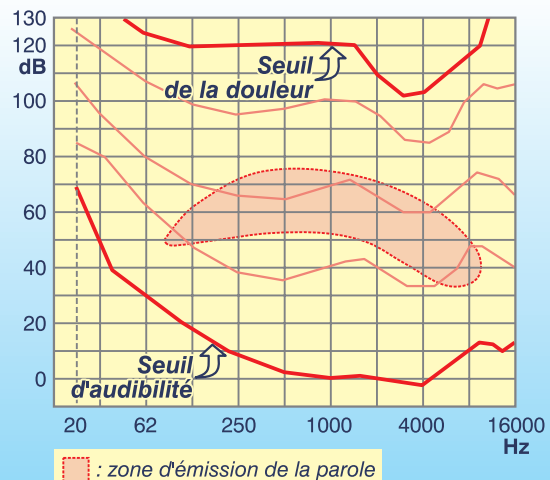
- dB(A) traduisant le comportement de l'oreille pour les niveaux compris entre 0 et 55 dB ;
- dB(B) traduisant les niveaux compris entre 55 dB et 85 dB ;
- dB(C) traduisant les niveaux supérieurs à 85 dB.

La zone de bruits gênants dans le bâtiment concerne uniquement la première plage.

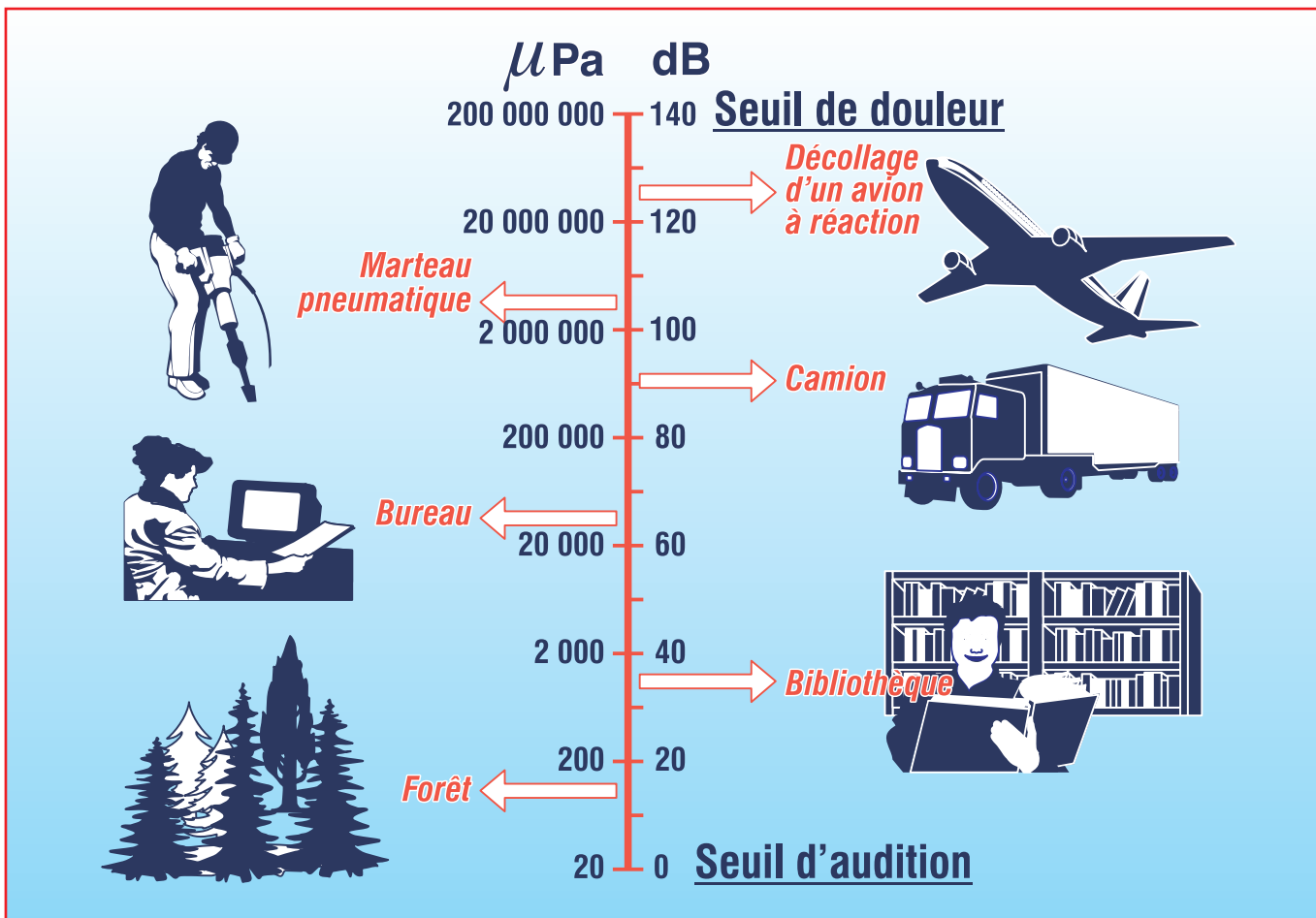
Dans le bâtiment, on distingue essentiellement 4 types de bruits :

- les bruits aériens intérieurs : conversation, télévision...
- les bruits aériens extérieurs : voitures, trains, avions, commerces, industries...
- les bruits d'impact émis par la vibration d'une paroi : chute ou déplacement d'objets, pas...
- les bruits d'équipements : machine à laver, chauffe-eau, ascenseurs, ventilation, canalisations...

Le son est une sensation auditive engendrée par la vibration d'un corps solide qui fait fluctuer périodiquement la pression de l'air au niveau du tympan de l'oreille. Le bruit est un mélange de sons.



Courbes d'égal sensation de l'oreille (Isosonie) (d'après JY Palheire). **1**



2 L'échelle d'audition.

L'isolation acoustique d'un local dépend essentiellement de la possibilité de transmission directe ou latérale des bruits, et donc de la qualité acoustique des parois constitutives du bâtiment ainsi que de la qualité de mise en œuvre des détails techniques des liaisons. On parlera donc d'isolation acoustique lorsque le récepteur est séparé de l'émetteur sonore par une paroi.

Pour connaître la qualité acoustique d'une paroi, des tests de laboratoire permettent d'identifier un indice d'affaiblissement acoustique "R" (exprimé en dB(A)) pour chaque matériau. Cet indice prend en compte uniquement la transmission directe du bruit au travers de la paroi. Pour prendre en compte les transmissions latérales et finalement connaître l'isolement acoustique, on parle d'indice d'isolement acoustique D_n exprimant en dB(A) l'isolation acoustique globale entre deux locaux. Généralement, la différence entre R et D_n est de 5 à 8 dB(A). Pour obtenir un D_n de 54 dB(A), il faudra choisir une paroi dont l'affaiblissement acoustique est au moins de 60 dB(A).

Pour les bruits d'impacts, la performance acoustique est caractérisée par l'indice d'efficacité acoustique L_n . Ainsi, à titre d'exemple, une dalle flottante de 8 cm de mortier de ciment sur 2 cm de laine minérale procure une isolation acoustique d'environ 25 dB(A).

Pour obtenir une bonne isolation acoustique, la conception du projet peut jouer sur deux paramètres des matériaux utilisés : la masse et l'élasticité. En effet, la loi de masse montre que l'affaiblissement acoustique d'une paroi augmente avec sa masse surfacique (figure 1). Ainsi, à titre d'exemple, une paroi de 100 kg/m² apporte un isolement de 40 dB(A) pour les bruits aériens à une fréquence de 500 Hertz. Si l'on double la masse surfacique de la paroi, la valeur de l'isolement acoustique est augmentée de 4 dB(A).

L'élasticité caractérise l'effet d'amortissement acoustique d'un matériau.

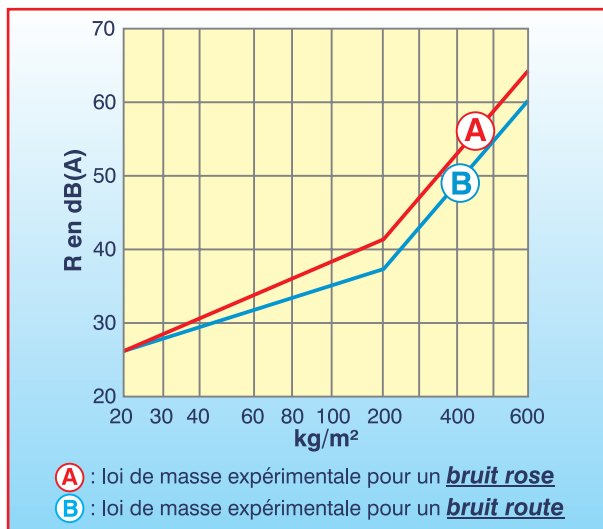
D'autre part, selon la loi de fréquence, si la fréquence double, l'affaiblissement acoustique de la paroi augmente également de 4 dB(A). Remarquons qu'il existe pour chaque matériau une fréquence critique où l'indice d'affaiblissement acoustique peut chuter de 10 dB(A).

Il est aussi possible de jouer sur les deux paramètres en proposant des parois doubles intégrant masse et élasticité. Ces parois doubles sont constituées d'éléments simples et séparés par une lame d'air ou un matériau absorbant. L'utilisation de parois doubles permet généralement d'atteindre des niveaux d'isolation acoustique supérieurs à ceux d'une paroi simple de même masse surfacique. L'indice d'affaiblissement d'une paroi double dépend de :

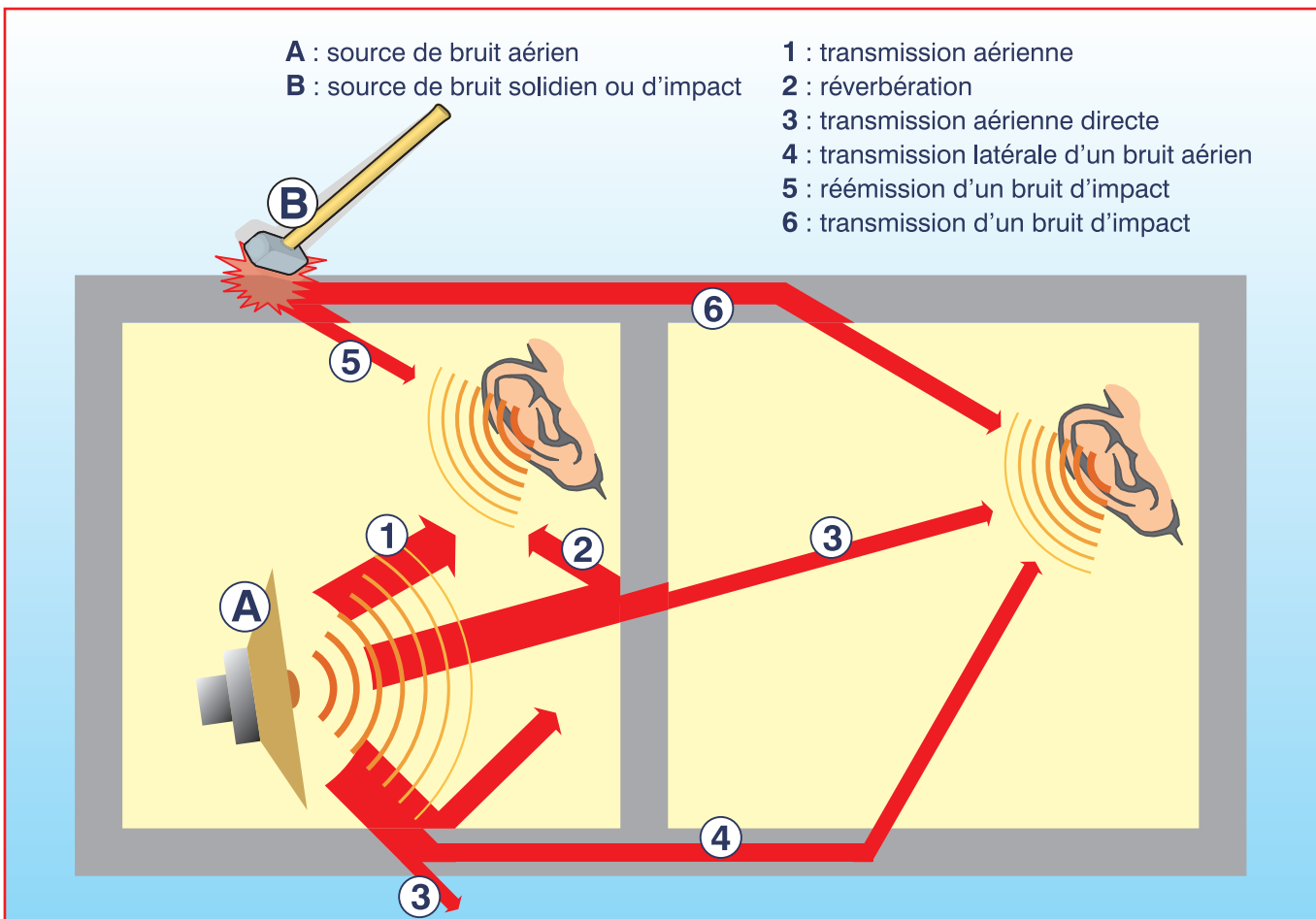
- la masse des éléments rigides ;
- l'épaisseur de la lame d'air séparant les éléments rigides ;
- l'épaisseur du matériau absorbant ;
- la fréquence critique de chaque élément ;
- la fréquence de résonance de la paroi double.

Ainsi, à titre d'exemple, l'isolement acoustique (D_n) de 2 plaques de plâtre sur ossature métallique avec 5 cm de laine minérale est de 40 dB(A).

L'isolation acoustique concerne l'ensemble des mesures techniques et des procédés constructifs mis en œuvre pour obtenir une performance acoustique souhaitée pour un local par rapport aux locaux voisins ou à l'extérieur.



Loi de masse (d'après J.-Y. Palheire). **1**



2 Transmissions de bruit en fonction de la source (d'après J.-Y. Palheire).

On parlera de correction acoustique lorsque l'émetteur et le récepteur sont dans les mêmes pièces. L'ambiance acoustique d'un local est caractérisée par la durée de réverbération "Tr" ou "T60". La durée de réverbération est le temps exprimé en seconde, nécessaire pour que le niveau sonore d'un local diminue de 60 dB lors de l'arrêt brusque de la source sonore. La durée de réverbération peut se calculer selon la formule expérimentale de Sabine :

$$Tr = 0,16 \times \text{volume du local (m}^3\text{)} / \text{aire d'absorption équivalente (m}^2\text{)}$$
où l'aire d'absorption équivalente est égale à la somme de chaque surface multipliée par son coefficient α Sabine.

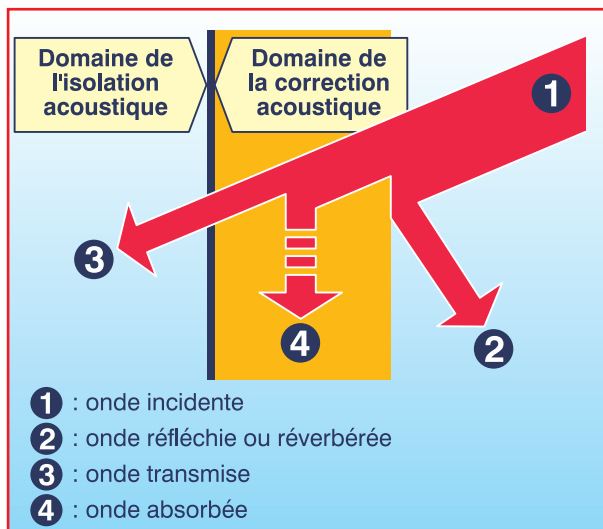
La durée de réverbération varie donc en fonction du volume et de l'aire d'absorption équivalente. Plus le local est grand, plus il risque d'être réverbérant.

La correction acoustique d'un local dépend donc de la mise en œuvre de matériau absorbant. Le degré d'absorption acoustique identifié par le coefficient α Sabine détermine la quantité d'énergie absorbée par un matériau. Il s'agit d'un pourcentage exprimant le rapport entre la part absorbée et la part totale d'énergie. Si le coefficient α Sabine est égal à 1, cela signifie que la paroi absorbera la totalité de l'énergie sonore. Il s'agit d'un matériau absorbant. À l'inverse, s'il est égal à 0, le matériau réfléchira la totalité de l'énergie : le matériau est réverbérant. À titre d'exemple, à 125 Hz, le coefficient α Sabine du béton brut est de 0,01.

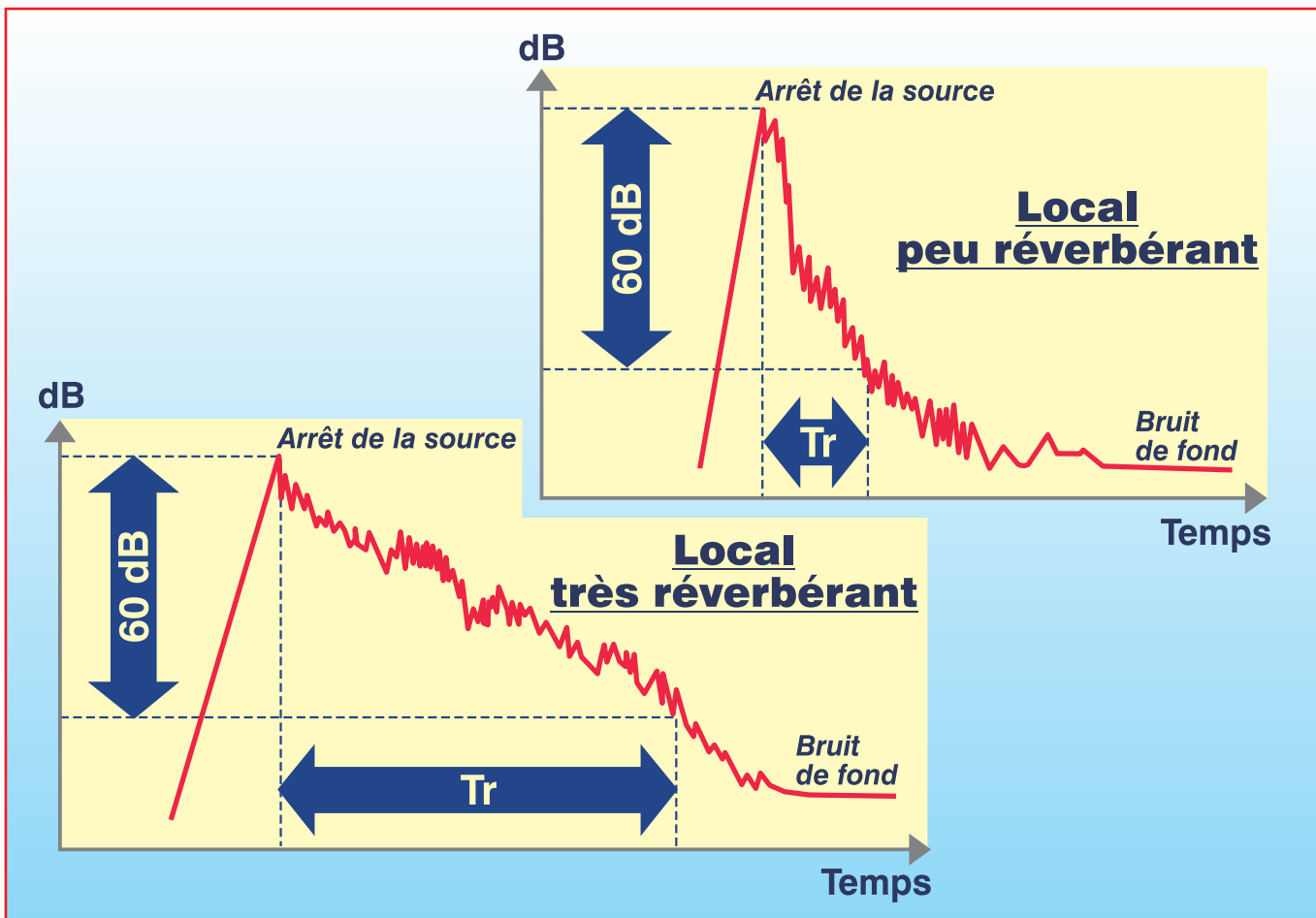
On rencontre différents types de matériaux capables de réduire la réverbération due aux réflexions de l'onde sonore qui les frappent. Il existe essentiellement trois procédés d'absorption acoustique :

- l'effet de membrane pour les basses fréquences en utilisant des panneaux susceptibles de fléchir et de se déformer sous la pression acoustique ;
- l'effet des résonateurs groupés pour les fréquences médiums en utilisant des plaques perforées ou rainurées ;
- l'effet dissipateur pour les fréquences hautes en utilisant des matériaux fibreux à porosité ouverte comme les laines minérales.

La durée de réverbération est le temps exprimé en seconde, nécessaire pour que le niveau sonore d'un local diminue de 60 dB lors de l'arrêt brusque de la source sonore.



Isolation et correction acoustique **1**
(d'après J.Y. Palheire).



2 Durées de réverbération en seconde (d'après J. Claessens).

Pour répondre à des conditions de confort acoustique optimales, l'équipe de conception doit apporter toute son attention aux nuisances acoustiques pouvant provenir :

- des bruits aériens extérieurs ;
- des bruits aériens intérieurs ;
- des bruits d'impacts sur les parois ;
- des bruits d'équipements.

Face aux bruits aériens provenant de l'extérieur, les fenêtres sont généralement les premiers éléments faibles de la façade. En cas de gênes potentielles par les bruits extérieurs (voitures, trains, avions...), il convient de choisir des vitrages acoustiques asymétriques et de faire poser un joint de calfeutrement. Les grilles d'entrée d'air de ventilation sont également considérées comme un élément faible de la façade. Elles doivent répondre à un indice D_n qui doit être supérieur d'au moins 5 dB(A) par rapport à l'isolement acoustique recherché pour la globalité de la façade. Certains coffres de volets roulants peuvent également nuire à l'isolation acoustique de la façade s'ils ne sont pas pourvus de matériaux absorbants.

Pour les bruits aériens intérieurs, outre le fait de pouvoir réduire à la source le bruit émis, la seule solution est de pouvoir limiter les transmissions sonores entre les locaux par un zonage acoustique adéquat et par une isolation acoustique entre les locaux bruyants et les locaux calmes. Notons que dans les immeubles de bureaux de nombreuses transmissions passent par les faux-plafonds et non par les cloisons légères.

Pour les bruits d'impacts, généralement sur le sol, l'utilisation de matériaux absorbants apparaît souvent comme la seule solution dans les habitations. En pratique, un bon amortissement des bruits d'impacts par voies solides peut être atteint en limitant à la source les transmissions de bruits par l'interposition d'un isolant entre la source de vibration et le bâtiment. Peuvent être utilisés des produits d'isolation qui sont élastiques sous l'effet de la charge, comme le liège, le caoutchouc, les laines minérales, les mousses plastiques molles... Souvent il est plus facile et plus logique de séparer du reste du bâtiment un système complet, par exemple les locaux sanitaires, au moyen d'isolation, que de procéder à l'isolation des composants individuels. La transmission du bruit par le système de conduites peut être évitée en utilisant des manchons élastiques à compensation.

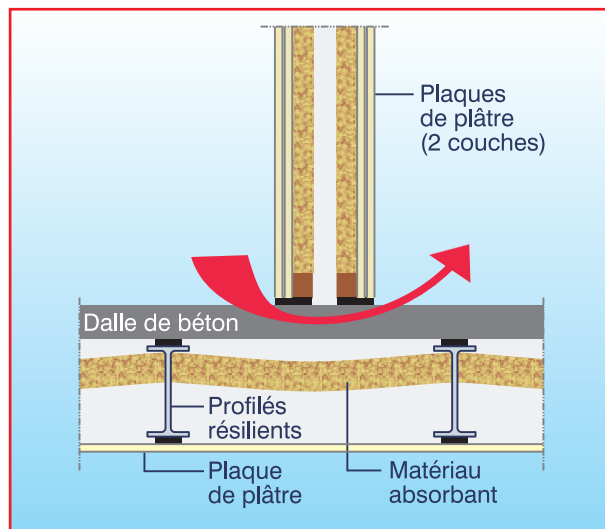
Quant aux bruits d'équipements, leurs origines peuvent être diverses :

- équipements collectifs : ascenseur, chaudière, extracteur d'air, vide-ordures...
- équipements individuels : chauffe-eau, canalisations, robinetteries, sanitaires...
- équipements privés : lave-vaisselle, machine à laver le linge, séchoir...

Chaque source doit être traitée de manière spécifique par la pose de matériaux résilients.

Que ce soit pour les bruits aériens, les bruits d'impacts ou les bruits d'équipements, le bruit passe par le moindre défaut de conception ou de mise en œuvre. Ainsi, la figure 1 montre que les bruits peuvent passer notamment au droit des cloisons au travers de la dalle béton continue sous deux locaux. Pour arrêter la transmission du bruit, il faut le couper, empêcher qu'il poursuive son chemin, que ce soit en créant une coupure, en insérant un matériau absorbant, en déviant plusieurs fois son chemin, ...

La réduction des bruits à la source s'avère souvent comme la première solution et la moins onéreuse pour maîtriser la propagation des nuisances sonores.



Transmission des bruits au droit des cloisons. **1**

Type de bruits	Local d'émission		Local de réception					
			Exigences réglementaires Dn ou Dn AT en dB(A)			Label qualité : confort acoustique Dn ou Dn AT en dB(A)		
			Séjour	Chambre	Cuisine Salle d'eau	Séjour	Chambre	Cuisine Salle d'eau
Bruits aériens	Autres logements	Chambre	54	54	54	56*	56*	48**
		Séjour	54	54	54	56*	56*	48
		Cuisine Salle d'eau	54	54	54	56*	59	48
	Locaux d'activités		59	59	59	59	59	53
	Circulations communes		41	41	41	46	46	38
	Séjour du même logement		-	-	-	-	41	-
Bruits d'impacts	Tous locaux		70			65		
Équipements individuels	Autres logements		30	30	35	30	30	38
	Même logement		35	35	50	30	30	50
Équipements collectifs	Ventilation mécanique		30	30	35	25	25	35***
	Chaufferie, vide-ordures ascenseur, etc.		30	30	38	25	25	38

* : ces valeurs passent à 59 dB(A) pour les maisons individuelles jumelées ou en bande.
 ** : ces valeurs passent à 51 dB(A) pour les maisons individuelles jumelées ou en bande.
 *** : concerne uniquement les équipements de chauffage.

2 Les exigences de la réglementation acoustique française pour les logements (NRA - Nouvelle Réglementation Acoustique en France).

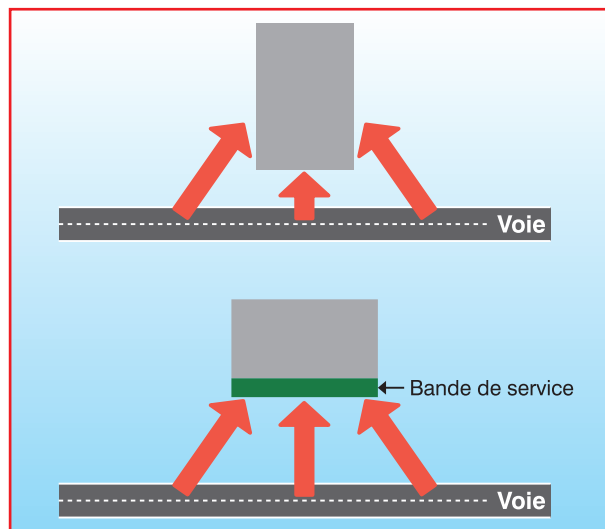
L'agencement des locaux au sein du bâtiment influe considérablement sur l'ambiance et le confort acoustique définis pour chaque local et pour l'ensemble du bâtiment. À titre d'exemple, l'isolement acoustique entre deux locaux dépendant de la surface commune de séparation entre ces locaux, leur disposition influe de manière importante sur la transmission des bruits (figure 2). Il est donc judicieux d'éviter d'accoler des pièces de service et des pièces de vie pour des logements voisins. La volumétrie et les proportions des locaux de réception influent également sur le confort acoustique. Ainsi, si l'on double le volume de réception, l'isolement acoustique est amélioré de plusieurs décibels.

Il convient donc de concevoir le plus en amont possible l'organisation des espaces en fonction des ambiances acoustiques souhaitées ou exigées par le maître d'ouvrage et les usagers. L'une des mesures les moins coûteuses et les plus simples à mettre en œuvre consiste à séparer nettement les locaux bruyants des locaux calmes tout en utilisant les locaux bruyants comme barrière acoustique par rapport aux nuisances extérieures. Ainsi, les "espaces servants" comprenant les cages d'ascenseurs, les sanitaires, les vide-ordures... peuvent être rassemblés dans un même volume bâti bien distinctement des espaces de vie comme les salles de séjour, les bureaux... Cette simple mesure permet généralement de minimiser l'emploi de barrières acoustiques, souvent fort coûteuses et difficiles à mettre en œuvre, tout en assurant aux usagers un confort acoustique optimal.

Lors de la conception des espaces, il convient d'être vigilant aux emplacements des portes qui constituent généralement un point faible de l'isolation acoustique entre deux locaux. Par exemple, dans le cas d'un hôtel, il peut être utile de prévoir un sas pour couper la transmission du bruit entre le couloir et la chambre à coucher. Une autre solution consiste à décaler les portes d'accès aux chambres pour réduire la transmission des bruits. Des matériaux absorbants peuvent être ajoutés complémentaires. Il est en effet souhaitable de pouvoir combiner des murs avec d'autres éléments tels que des portes ou des fenêtres.

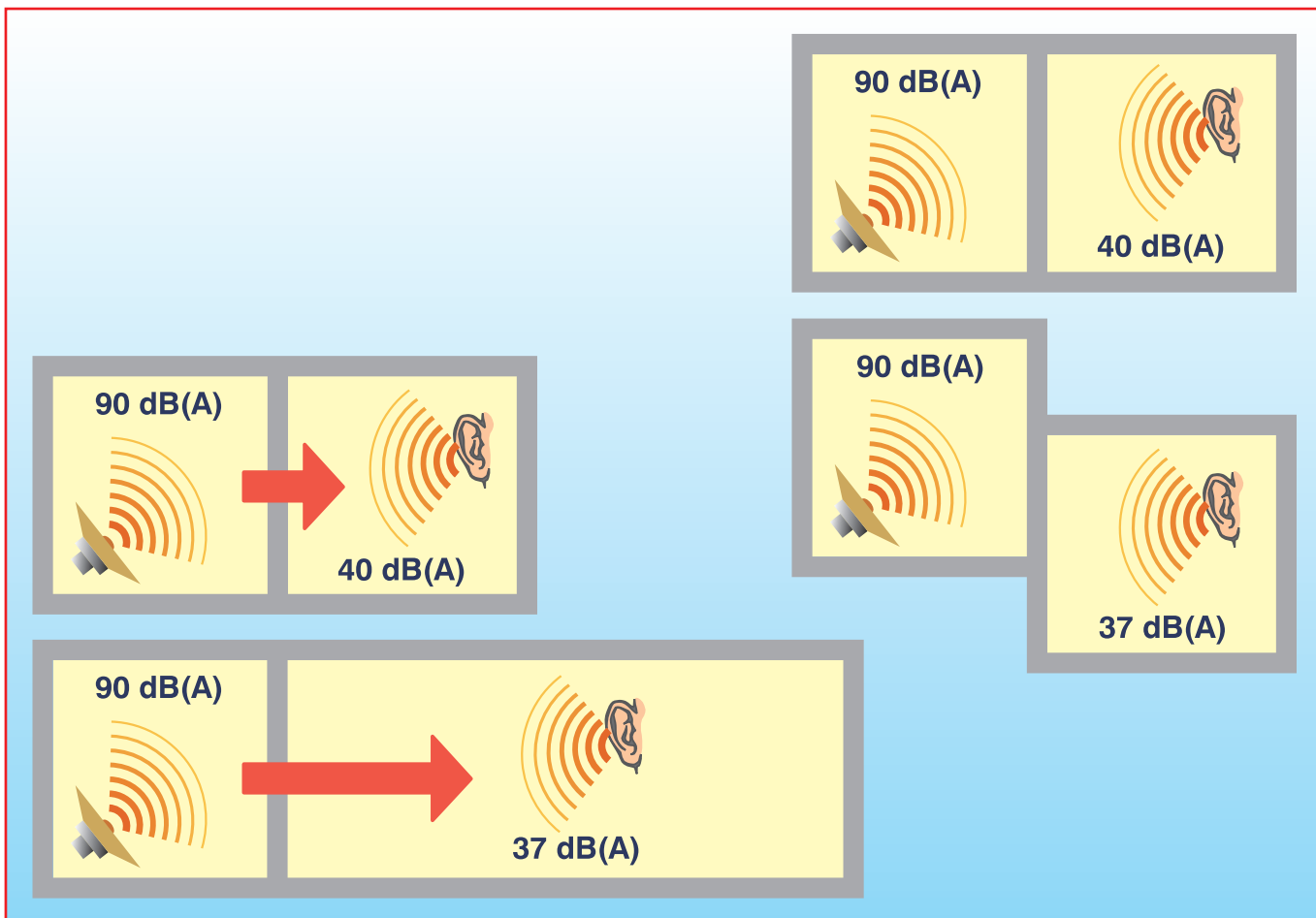
Des projets peuvent opter pour un zonage acoustique comme parti architectural de leur composition. Ainsi, confrontés à des exigences fortes souhaitées par les occupants d'un immeuble de bureaux HQE et à la présence, à moins de 300 mètres, du périphérique de Grenoble, les architectes ont proposé de rassembler dans une bande de service tous les services du bâtiment : ascenseurs, sanitaires, espaces de circulation, espaces techniques, archives... (figure 1). La création de cette bande servante recouvre un double intérêt. Tout d'abord, elle crée une barrière entre les plate-formes de bureaux et le périphérique routier. Ensuite, le fait de rassembler dans un volume bien distinct les locaux "bruyants" devrait limiter la transmission des bruits "techniques" vers les lieux de travail.

Le zonage acoustique séparant les locaux bruyants des locaux calmes permet sans surcoût d'assurer aux occupants un confort acoustique optimal.



Influence de l'implantation d'un bâtiment (Architectes Futur A).

1



2 Influence de la volumétrie et des surfaces de séparation (d'après J.Y. Palheire).

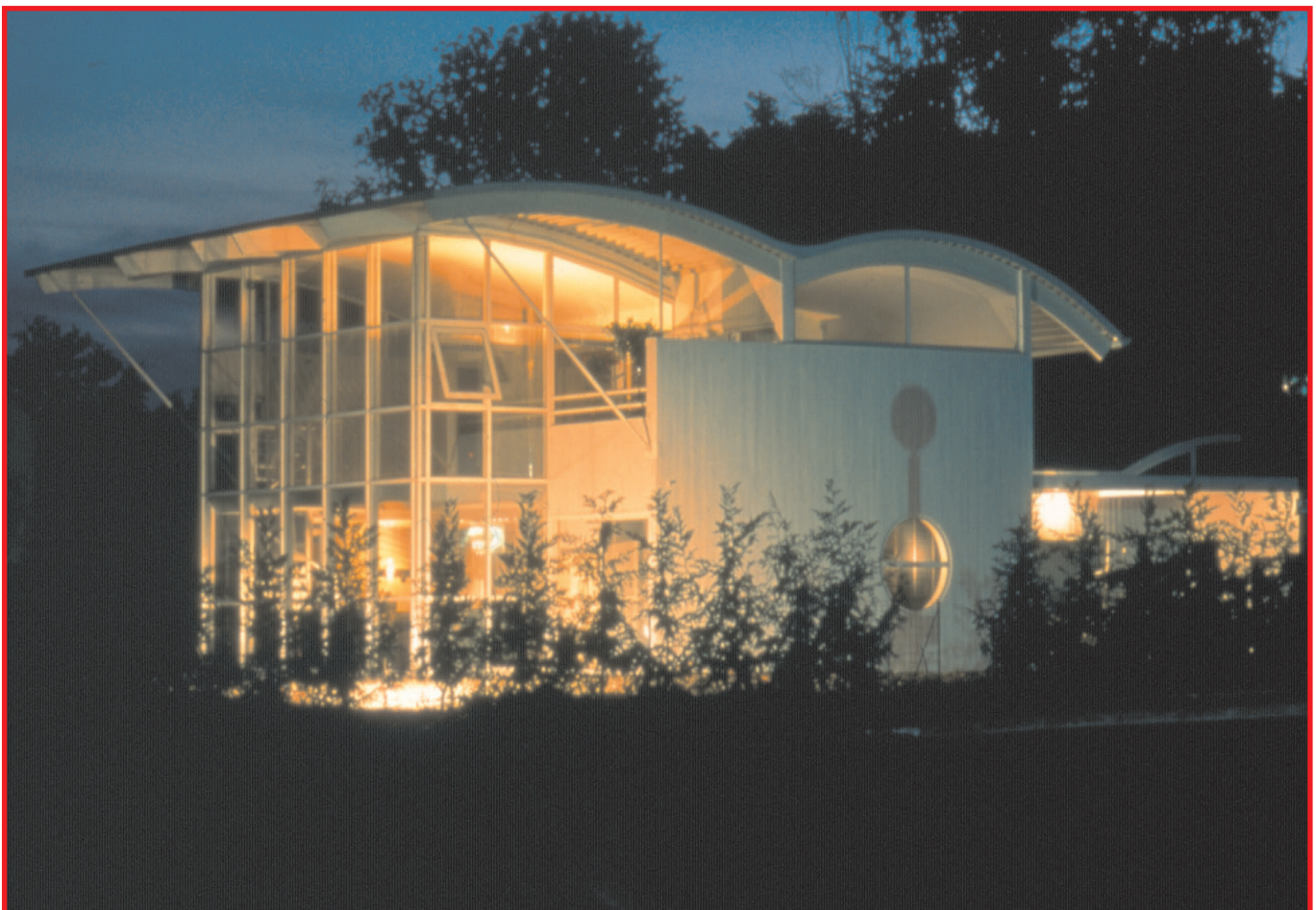
Au-delà de la qualité environnementale, l'architecture du projet se doit d'offrir une qualité de vie accrue aux futurs occupants par des ambiances de qualité et diversifiées. Les ambiances architecturales ou urbaines concernent des registres variés qui font appel à des paramètres quantifiables ou à des phénomènes qualitatifs. Il y est notamment question de sentiments, d'émotions ressenties par les usagers autour de formes spatiales et temporelles mais aussi de connaissances subjectives sur des valeurs morales dont tiennent compte les habitants. Chaque culture ou groupe social développe des modes de perception des ambiances selon son expérience sensible.

L'architecte Frédéric Nicolas a ainsi pu pour la maison Défossé à Saignon (figure 1) jouer des contraintes visuelles du site en organisant l'habitation autour d'un patio, préservant ainsi l'un des arbres existant sur la parcelle. Le patio est traité comme une cour semi-ouverte côté sud. Ainsi, le séjour s'ouvre largement sur le patio à l'est, alors que les vues vers le sud et l'ouest sont cadrées dans d'étroits bandeaux disposés à environ 2 mètres du sol, de manière à préserver l'intimité de la pièce. De même, le patio est protégé par un muret de 1,50 mètre. Ce patio apporte donc une réelle plus-value au bâtiment en offrant des ambiances de qualité qui en font son charme.

**La qualité des vues
peut déterminer le parti
architectural et créer
des ambiances spatiales
où les futurs usagers
pourront trouver un
sentiment de bien-être.**



Maison Défossé à Saignon **1**
(Architecte F. Nicolas).



2 Maison domotique avec grandes ouvertures vitrées près de Tours (France) (Architecte J-Y Barrier).

Les projets bioclimatiques (écoles, bureaux, logements...) ont mis assez tôt l'accent sur la notion d'éclairage naturel, et ce pour de multiples raisons :

- intérêt économique par la réduction des consommations d'énergie électrique. Certaines études européennes montrent que l'on peut espérer un gain de 30 % sur la consommation électrique destinée actuellement à l'éclairage des bâtiments publics. Cette réduction contribue également à diminuer les gains internes produits par l'éclairage artificiel et donc les besoins en rafraîchissement ;
- intérêt environnemental par la réduction des diverses pollutions générées par la production d'électricité et par les équipements électriques (déchets radioactifs, gaz à effet de serre, déchets spéciaux des tubes...);
- intérêt psychophysologique par le rôle bactéricide de la lumière naturelle et par ses variations selon les heures de la journée. Combinant une température de couleur élevée à un spectre continu dans le domaine visible, sa qualité reste inégalée, même par l'éclairage artificiel le plus performant. Cet aspect est d'autant plus important pour la conception de bureaux où une mauvaise acuité visuelle est source de fatigue oculaire, perte d'attention, maux de tête, mauvaise posture... D'une manière générale, l'apport maîtrisé de la lumière naturelle vers les espaces intérieurs favorise le confort visuel des usagers du bâtiment.

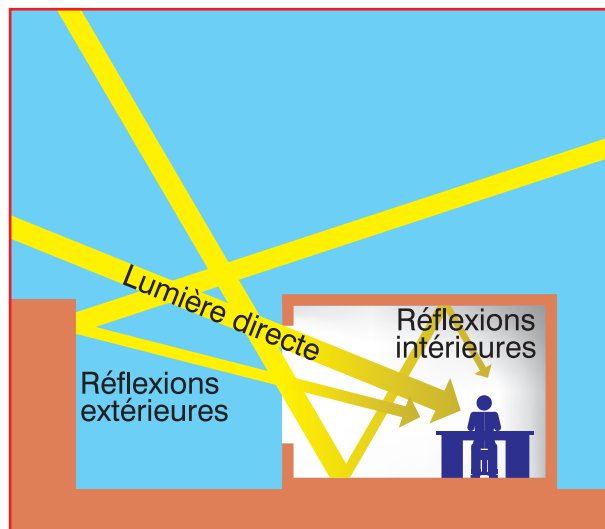
Dans ce contexte, le concepteur utilise essentiellement la méthode simplifiée du facteur de lumière du jour. Elle détermine les valeurs du facteur de lumière du jour par ciel couvert à hauteur du plan de travail, c'est-à-dire les valeurs du rapport de l'éclairage naturel intérieur reçu en un point du plan de travail à l'éclairage extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé sous des conditions de ciel couvert.

$$FLJ = E_{\text{intérieur}} / E_{\text{extérieur}} (\%)$$

Le calcul est réalisé par la décomposition du facteur de lumière du jour en trois variables : la composante directe du soleil, la composante externe réfléchie et la composante interne réfléchie. Le résultat est indépendant de l'orientation du local, de la saison et de l'heure de la journée. Il prend en considération un ciel théorique normalisé par la "Commission Internationale de l'Eclairage" (CIE) caractérisé par une luminance au zénith trois fois plus élevée qu'à l'horizon. Conventionnellement, la CIE propose de prendre un niveau d'éclairage lumineux pour un ciel couvert de l'ordre de 5 000 lux sur une surface horizontale comme base pour les applications pratiques du calcul de l'éclairage naturel dans les bâtiments.

Des notions plus qualitatives, comme par exemple d'uniformité de l'éclairage ou de contrastes, restent encore peu utilisées.

Le Facteur Lumière du Jour (FLJ) indique le rapport entre la quantité de lumière naturelle disponible à l'extérieur par ciel couvert et la quantité de lumière naturelle reçue dans le local à hauteur du plan de travail.



Les différentes composantes de l'éclairage naturel. **1**

Facteur de lumière du jour	Moins de 1 % Très faible	De 1 % à 2 % Faible	De 2 % à 4 % Modéré	De 4 % à 7 % Moyen	De 7 % à 12 % Élevé	Plus de 12 % Très élevé
Zone considérée	<i>Zone éloignée des fenêtres (distance supérieure à 3 x la hauteur de la fenêtre)</i>			<i>Zone à proximité des fenêtres ou sous des lanternaux</i>		
Impression de clarté	<i>Sombre à peu éclairé</i>		<i>Peu éclairé à clair</i>		<i>Clair à très clair</i>	
Remarques	<i>Convient aux zones de circulation, de stockage, ...</i>		<i>Convient aux locaux de travail</i>		<i>Attention aux éblouissements</i>	
Impression visuelle	<i>Cette zone semble être séparée de cette zone.</i>					
Ambiance	<i>Le local semble être refermé sur lui-même</i>			<i>Le local s'ouvre vers l'extérieur</i>		

2 Variations des impressions visuelles de clarté et d'ambiance en fonction du FLJ (AFE - Association Française de l'éclairage).

L'éclairage artificiel est étudié comme complément de l'éclairage naturel pour contribuer au confort visuel des occupants. Les luminaires peuvent être qualifiés par trois caractéristiques principales :

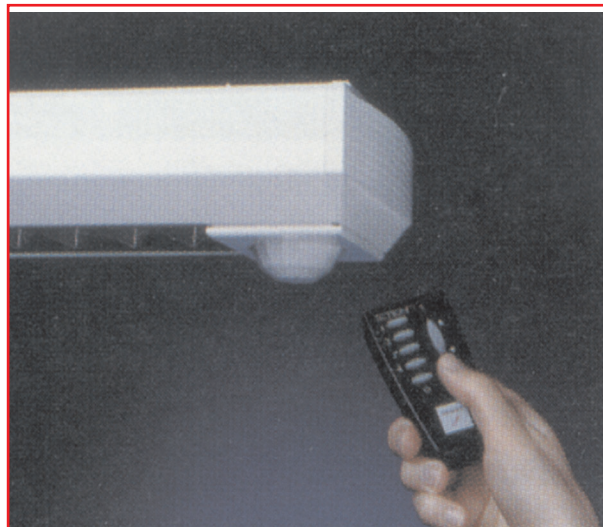
- le niveau d'éclairement qui exprime la quantité de la lumière reçue sur une surface. Le nombre de lux est déterminé par les agences de l'éclairage pour chaque type d'activité : bureau, salle de classe, sanitaires, salle de conférence... ;
- l'efficacité lumineuse (en lumens/watt) permettant de comparer facilement les luminaires entre eux. Plus son efficacité est grande, plus la lampe émet une grande quantité de lumière pour une faible consommation électrique. L'efficacité lumineuse d'une ampoule à incandescence est comprise entre 12 et 20 lm/W alors que celle des lampes fluorescentes est comprise entre 40 et 100 lm/W ;
- le rendu de couleurs dont l'indice varie entre 60 et 100 indique l'aptitude d'une lampe à ne pas déformer l'aspect des objets éclairés. Pour avoir un bon rendu, l'indice de rendu de couleurs doit être supérieur à 75 ou 80.

La qualité de l'éclairage artificiel provient donc de la qualité des équipements mis en œuvre et proposé par l'équipe de maîtrise d'œuvre. Ainsi, à titre d'exemple, les luminaires fluocompactes à haut rendement de type T5, T8 ou T10 avec enduit triphosphoré apparaissent des plus intéressants car ils diffusent une lumière "blanche" obtenue à partir de trois phosphores de terres rares émettant des ondes de largeur maximale dans le bleu, le vert et le rouge. Les ballasts électroniques complétant maintenant ce type d'équipement contribuent aussi au confort visuel, car ils permettent de supprimer l'effet de papillotement lorsque les ballasts standards sont âgés.

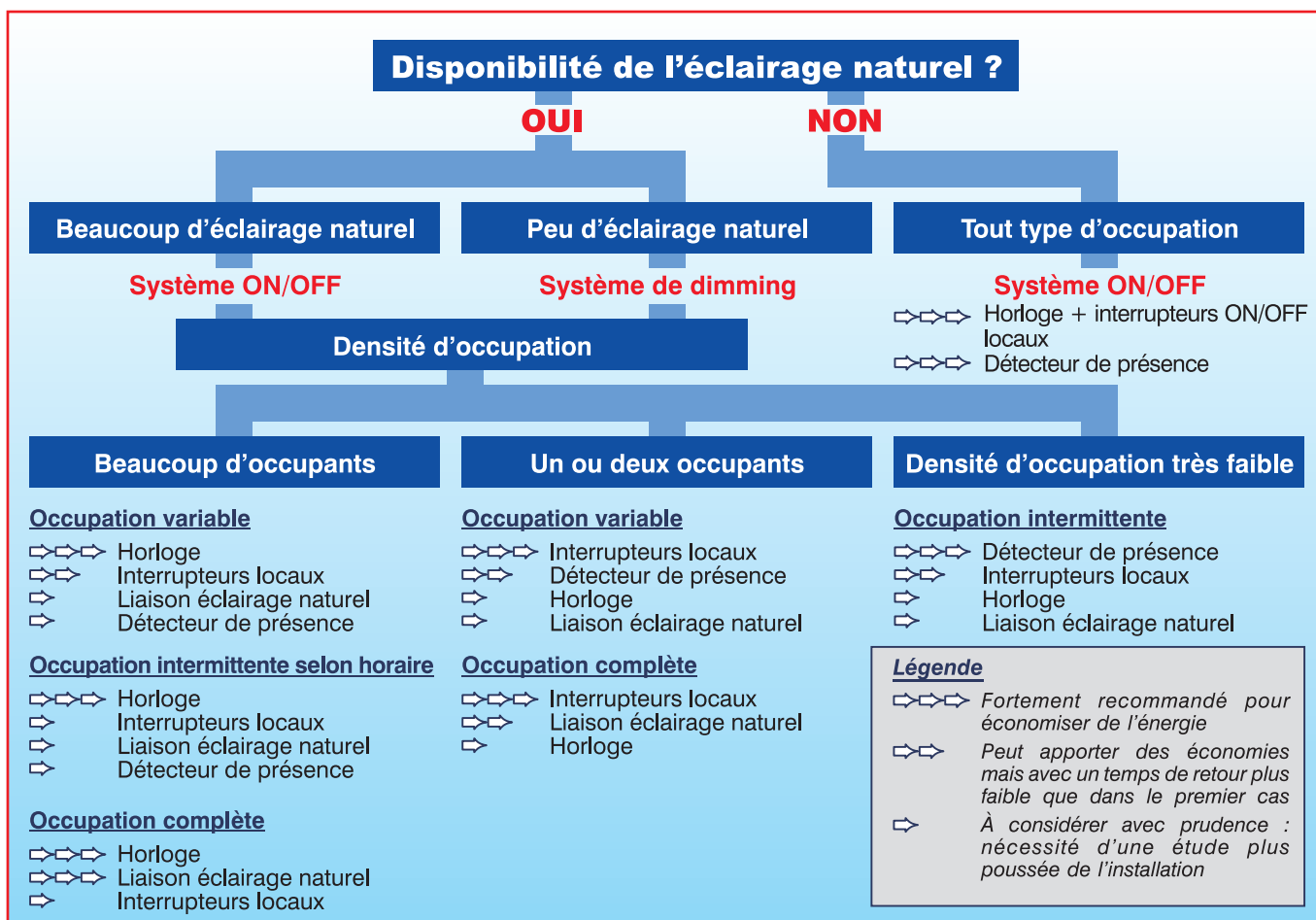
Si le confort visuel est primordial pour le choix des luminaires, ce choix dépend aussi de leur performance énergétique. L'utilisation d'équipements performants et de ballasts électroniques permet en effet de réduire de plus de 30 % les consommations électriques dues à l'éclairage des immeubles tertiaires. C'est dans ce sens que la Commission européenne a adopté au mois de septembre 2000 la directive européenne 2000/55/CE visant le rendement énergétique des ballasts. En ce qui concerne la performance énergétique de l'éclairage artificiel, la conception de l'installation doit être étudiée en complémentarité de l'éclairage naturel (figure 2). Pour atteindre 2,5 W/m²/100 lux, des dispositifs complémentaires peuvent être si besoin mis en œuvre : dimmer, permettant la gradation du flux lumineux de 1 ou 2 % jusqu'à 100 %, détecteur de présence (figure 1), horloge... Ainsi, pour un bureau nécessitant 500 lux, la consommation électrique pour l'éclairage ne devrait pas dépasser 12,5 W/m².

La qualité de l'éclairage artificiel est essentielle lors de la conception des espaces de bureaux. Cette exigence demande à l'équipe de maîtrise d'œuvre de suivre d'une part la réglementation en vigueur, et notamment la directive européenne 90/270/CE concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relative au travail sur des équipements à écran de visualisation, et d'autre part les conseils des experts en médecine du travail ou les normes nationales ou internationales. Pour ce qui est des postes de travail sur écrans d'ordinateur, la norme ISO 9241 intitulée "Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation" fournit les principales recommandations d'ergonomie pour les points suivants : l'affichage, l'environnement et l'aménagement du poste, les réflexions, les couleurs affichées, le clavier et les dispositifs d'entrée, ainsi que le dialogue avec l'ordinateur. L'application de l'ensemble de ces recommandations ou prescriptions devrait permettre d'aboutir à des espaces de qualité où les conditions ergonomiques, et donc le confort visuel, répondent parfaitement à l'usage qui en sera fait.

La qualité de l'éclairage artificiel dépend de la qualité des luminaires et donc de leurs principales caractéristiques : niveau d'éclairement, efficacité lumineuse et rendu de couleurs.



Régulation de l'éclairage artificiel par rapport à l'éclairage naturel (Trilux Belgium). **1**



2 Conception de l'éclairage artificiel en complémentarité à l'éclairage naturel.

Une odeur est un ensemble de composés chimiques présents dans l'air et que notre système olfactif perçoit, analyse et décode pour fournir *in fine* un jugement qualitatif sur l'ambiance olfactive. Si les analyses des odeurs permettent d'identifier les molécules présentes ainsi que leur concentration, aucune information claire ne peut se dégager sur le caractère odorant du mélange. Certaines odeurs gênantes peuvent être immédiatement ressenties. D'autres ne deviennent dérangeantes qu'à partir d'un certain niveau d'intensité. D'autres encore ne sont pas détectables par nos sens. Elles dépendent principalement de la sensibilité de l'individu, de son contexte socioculturel, de sa physiologie ou de sa capacité d'adaptation (accoutumance aux odeurs).

Pour le bâtiment, les sources d'odeurs peuvent provenir d'origines variées :

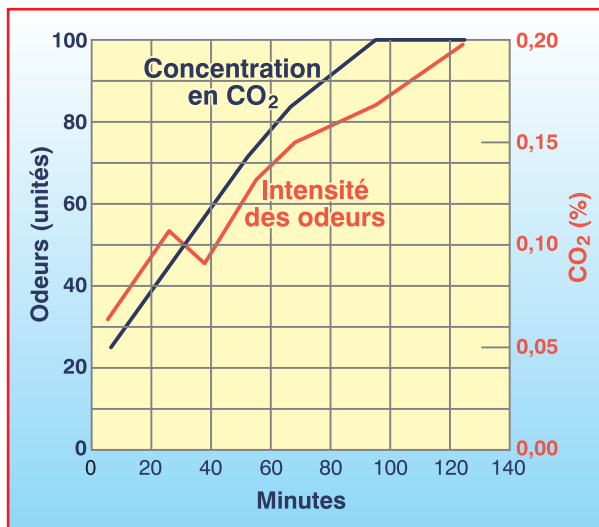
- les produits de construction (moisissures, composés organiques volatils, formaldéhyde...);
- les équipements aérauliques (humidité, poussières, ozone...);
- les usagers (fumée de cigarettes, cuisine, métabolisme...).

Hormis dans les bâtiments fraîchement construits ou rénovés, les odeurs proviennent généralement du métabolisme des occupants. Cependant, la fumée de tabac reste l'une des sources principales attribuées au sentiment d'inconfort olfactif.

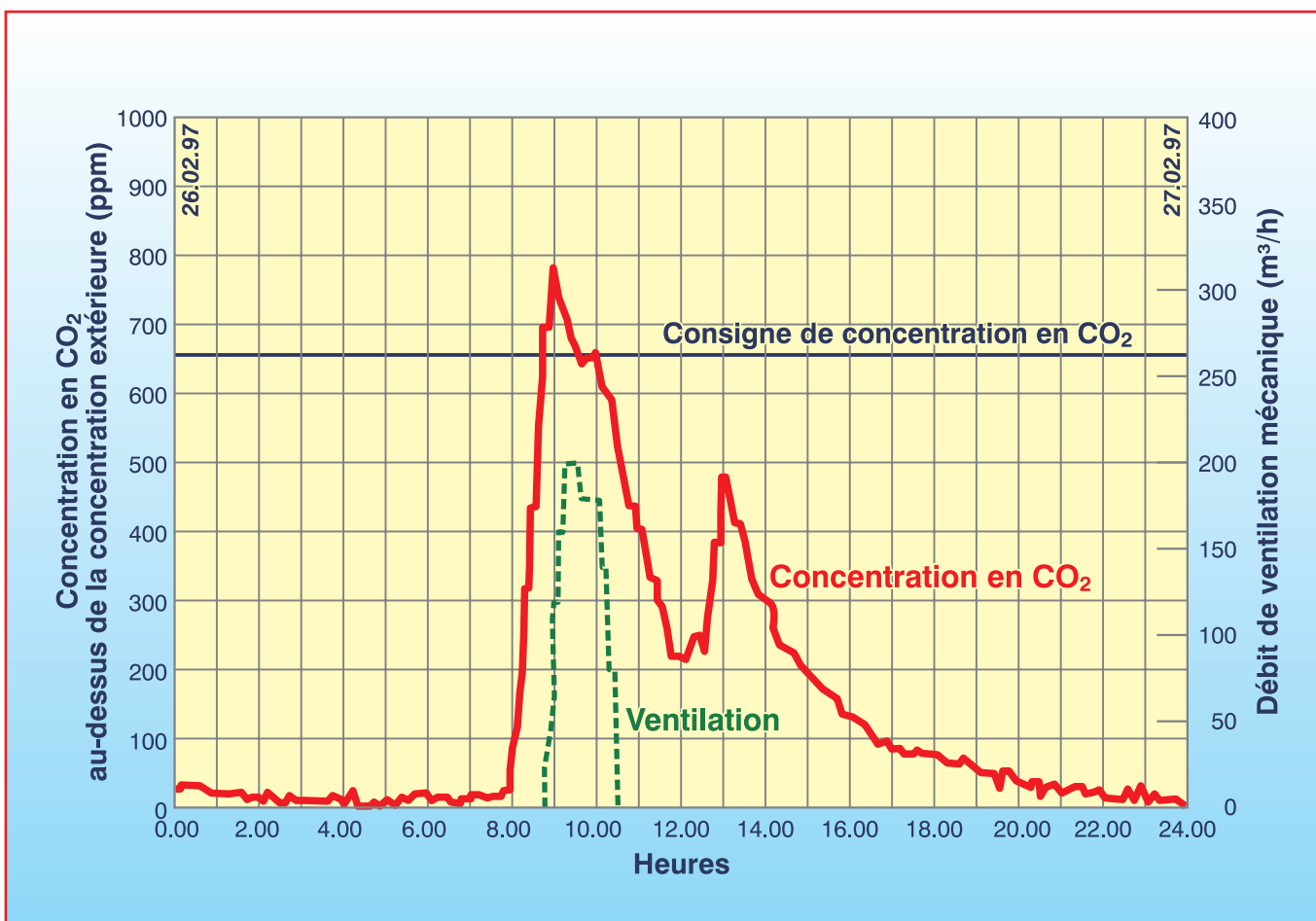
Bien qu'il n'existe pas de réglementations ou de normes portant sur le confort olfactif (à l'exception de celles concernant l'interdiction de fumer dans les lieux publics), la maîtrise d'œuvre se doit d'assurer des ambiances olfactives optimales. Une ventilation efficace du bâtiment permet souvent de limiter les risques d'inconfort olfactif. Bien qu'il est pratiquement impossible de mesurer les odeurs et de faire une estimation des valeurs limites, O. Fanger a pu établir le lien entre le pourcentage d'insatisfaits, l'intensité des odeurs et la teneur de CO_2 . La figure 1 montre ainsi que l'élévation de la concentration en gaz carbonique (exprimée en ppm) est proche de l'intensité des odeurs. Ses recherches ont permis de distinguer l'air vicié d'un local de l'air extérieur frais quand la teneur en CO_2 s'élève au-dessus de 0,15% en volume. Une concentration de CO_2 maximale de 0,15 % en volume correspond à un renouvellement de l'air de 20 m³/h par personne, soit un pourcentage prévisible de personnes insatisfaites de l'ordre de 25 %. Les normes internationales suggèrent de n'admettre pas plus de 20 % d'insatisfaction et donc d'obtenir 30 m³/h par personne de renouvellement d'air. Dans des locaux à usage spécifique, ces valeurs de référence peuvent être augmentées. Ainsi, dans une chambre d'hôpital, il convient de prendre un renouvellement d'air de 50 m³/h par personne.

Pour limiter les risques d'inconfort olfactif, il est possible d'utiliser des sondes COV ou CO_2 permettant de contrôler le débit de ventilation par rapport aux concentrations relevées. D'après les études menées par le Costic, les sondes COV ou de qualité de l'air sont plus sensibles aux locaux à forte pollution intérieure telle que la fumée de tabac. Les sondes CO_2 sont par contre uniquement sensibles à la présence de CO_2 , correspondant au taux d'occupation du local en question.

Une odeur est un ensemble de composés chimiques présents dans l'air et que notre système olfactif perçoit, analyse et décode.



Évolution parallèle entre la concentration en CO₂ et l'intensité des odeurs. **1**



2 Ventilation à la demande par mesure du CO₂ dans une salle de réunion (CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction)

1 - Gestion des flux de personnes et de matières :

Au travers d'activités, professionnelles ou domestiques, nécessitant de manier des produits toxiques ou organiques, les personnes peuvent affecter l'hygiène des locaux dans lesquels ils œuvrent, soit pour elles-mêmes, soit pour celles de leur entourage immédiat.

Dans la reprographie, certains travaux mettant en jeu des produits chimiques, électroniques, etc. nécessitent de séparer les flux des matières premières (et déchets) et les personnes au contact des dits produits.

Dans des bâtiments chauffés à des températures plus élevées comme les maisons de retraite, il faut être encore plus attentif à la gestion des flux (sensibilité extrême des personnes aux microbes et polluants de toutes nature).

Dans les locaux de restauration collective où peuvent se développer de nombreuses sources de contamination bactérienne ou microbienne, on privilégiera donc systématiquement les surfaces faciles à nettoyer et à désinfecter (éviter les matériaux présentant des joints).

Pour certains types de locaux, il importe aussi de tenir compte des conditions de confort (hygrothermique essentiellement) qui influent sur les usagers (exemple, une piscine : des douches inconfortables seront peu utilisées, ce qui multipliera les chloramines et autres, pollutions d'origine humaine).

Dans les toilettes et sanitaires, on dessinera des plans et choisira des équipements permettant le nettoyage de la totalité de la surface des sols (en préconisant par exemple des WC suspendus).

2 – Choix des matériaux :

Le choix des matériaux doit se faire dans le même esprit que pour la prise en compte des effets environnementaux des procédés de maintenance :

- choisir des revêtements ne nécessitant pas de produits d'entretien sinon veiller à ce que ceux utilisés ne soient pas nocifs (exemple : peintures ou peau lessivable) ;
- proscrire les matériaux émettant des substances comme l'acétone et le formaldéhyde (ils se trouvent généralement dans les liants et colles des revêtements, et les panneaux d'aggloméré ou de stratifié) ;
- s'assurer que les peintures et vernis choisis (qui émettent parfois des COV pendant de longues périodes) ne contiennent ni plomb, ni chrome hexavalent, ni cadmium ;
- sélectionner avec la plus grande vigilance les revêtements de sols textiles. Cependant il existe de plus en plus de matériaux nettoyables à l'eau et traités contre les acariens et autres parasites.

3 – Renouvellement d'air :

La ventilation et les dispositions prises pour supprimer les sources d'allergènes sont primordiales pour assurer les conditions d'hygiène.

La conception architecturale joue également un rôle important par l'organisation des espaces pour éviter que des locaux émetteurs potentiels de pollutions ne soient en contact avec des espaces sensibles, en particulier ceux, occupés par des personnes fragiles.

Un zonage précis, doit éviter les possibles migrations de polluants grâce aux moyens suivants :

- des sas ventilés ;
- l'orientation contre le vent dominant ;
- une hiérarchisation des pressions d'un espace vers un autre : les locaux demandant des conditions d'hygiène optimales seront mis en pression, tandis que les locaux émetteurs seront en dépression.

On appliquera des solutions similaires pour se protéger des gaz d'échappement.

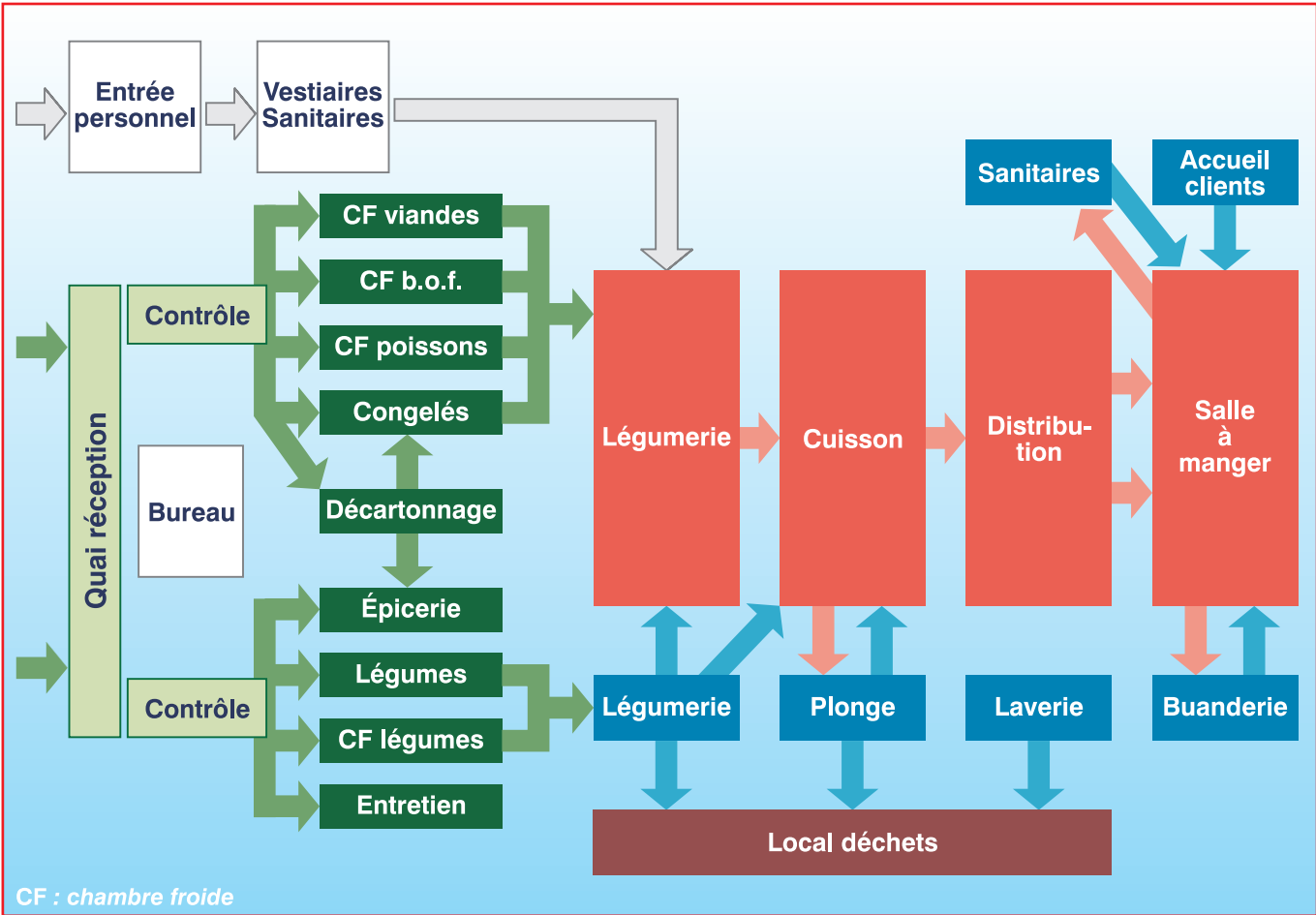
Par ailleurs, les modes de vie et mentalités, seront pris en compte : dans les espaces dédiés aux soins corporels, une ventilation double flux indépendante (pour éviter les migrations de sources polluantes venant des autres locaux) supprimera les courants d'air froids. Le but est d'éviter que les usagers ne bouchent les entrées d'air.

Pour les espaces dédiés à la culture physique, au lavage/séchage du linge, il faut prévoir une amenée d'air neuf, directe, et une extraction de l'air vicié modulée en fonction du taux d'occupation.

Créer de bonnes conditions d'hygiène fait partie de l'objectif général d'amélioration de la santé publique par une meilleure qualité sanitaire des espaces.



Salle de restauration au Tropicana à Hermes (France). 1



2 Gestion des flux de personnes et de matières dans la restauration collective : principe de la "marche en avant".

Faciliter le nettoyage et l'évacuation des déchets d'activités participe à la qualité sanitaire des espaces, et prolonge les modalités de gestion des déchets d'activités.

1- Facilitation du nettoyage :

Les locaux "ménage" doivent être conçus selon les exigences suivantes :

- les dimensions et l'agencement permettront au personnel d'entretien de se déplacer avec leur matériel dans les meilleures conditions, et de pouvoir stocker les produits et matériels (cireuses, aspirateurs...). Les cheminements doivent tenir compte de l'encombrement et des rotations à effectuer ;
- ils devront être contigus des locaux déchets : fonctions en principe séparées mais pouvant être regroupées dans les bâtiments ayant peu de déchets (propres et secs en majorité, et à l'exclusion de déchets toxiques et organiques) ;
- être répartis entre les différents étages et/ou secteurs.

La facilitation du nettoyage implique en outre la prise en compte dans la conception des locaux et notamment pour les circulations horizontales et verticales :

- des types de fenêtres, de leur disposition, hauteur, mode d'ouverture (oscillo-battants, à la française) permettant de nettoyer les faces intérieures et extérieures ;
- des matériaux, porosité, joints, plinthes, angles aigus ;
- des positions des prises électriques, vidoirs, siphons ;
- des dispositifs permettant de limiter les salissures (décrotteurs, tapis-brosses, matériaux des espaces extérieurs précédant l'entrée...) ;
- des possibilités d'éclairer les locaux (entretien effectué parfois en période nocturne).

Les locaux déchets doivent être agencés pour que leur nettoyage soit facile. Ils seront pourvus des raccordements nécessaires à leur entretien et à leur conservation : ventilation, éclairage, espace suffisant pour déplacer les conteneurs, siphon de sol, prise d'eau et prise électrique.

2 - Évacuation des déchets d'activités :

L'évacuation des déchets se décline depuis la production dans les différents bâtiments (restauration, bureaux, locaux médicaux, ateliers...), et s'organise à partir du tri effectué à la source par les usagers (ramassage), le stockage initial, le déplacement vers le local déchet puis vers le lieu d'évacuation.

Au cours de cette chaîne (qui peut représenter un parcours de plusieurs dizaines de mètres), les espaces traversés doivent permettre une évacuation aisée grâce à la dimension des circulations, à la nature du revêtement du sol et à l'absence de déclivité (ou équipé des moyens de levage *ad hoc*).

Le circuit des déchets dans le bâtiment doit être simulé en phase projet pour vérifier la facilité d'évacuation des déchets, et pour modifier, le cas échéant emplacements et/ou circulations. L'évacuation des déchets sera alors effectuée selon un trajet optimisé.

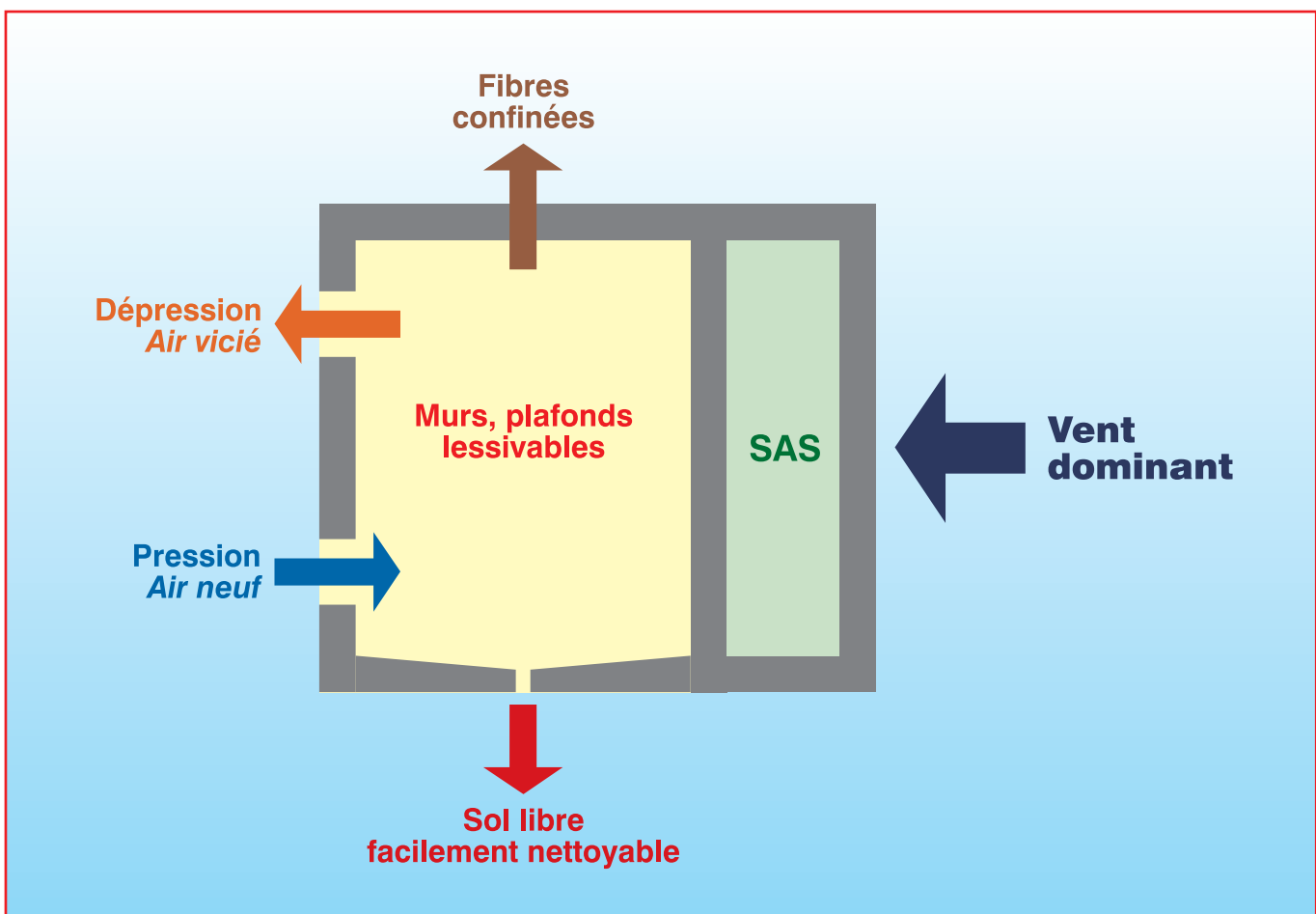
Optimiser le stockage (proche de la production) et l'évacuation (proche du lieu d'enlèvement) nécessite des compromis et implique de répartir dans les bâtiments des aires intermédiaires de stockage des déchets. Des matériels de compactage et de stockage peuvent s'envisager afin de limiter le volume et parfois la toxicité des déchets (pré-traitement *in situ*).

L'aire ou le local de stockage final sera situé afin de faciliter l'enlèvement et la rotation des bennes, et étudié en fonction des vents dominants de façon à protéger des odeurs nauséabondes les locaux voisins.

Faciliter le nettoyage et l'évacuation des déchets d'activité participe à la qualité sanitaire des espaces, et prolonge les modalités de gestion des déchets d'activité.



Sol uniforme et mobilier facilement déplaçable. **1**



2 Exemple de dispositions pour la faciliter le nettoyage.

La facilitation des soins de santé rejoint la problématique générale de qualité sanitaire des espaces. Elle se décline ici (en dehors des bâtiments du monde de la santé) suivant un objectif d'amélioration de la santé publique dans toutes les autres catégories de locaux : enseignement, hôtellerie, tertiaire, résidentiel, etc.

Deux objectifs sont à prendre en compte :

- le premier relatif à l'architecture des locaux spécifiques pour l'accueil des personnes devant se faire soigner (ou prendre un temps de repos consécutif à un malaise) ;
- le second vise à établir une fluidité entre les locaux de soins et les services d'urgences extérieurs (pompiers, médecins et ambulances).

1. Les locaux concernés sont principalement les infirmeries, salle de soins, salles de repos. Pour faciliter les soins, il s'agit de disposer de locaux pratiques, équipés en fonction des besoins prévisibles et donc du type de bâtiment et d'activité. Les situations étant très diversifiées, le maître d'ouvrage devra préciser l'occupation et le fonctionnement des locaux.

Chaque local doit être conçu avec la création d'une zone de confort (physique et psychique) pour l'occupant en situation de faiblesse :

- choix des matériaux, des couleurs ;
- absence d'angles vifs ;
- hauteur des baies et vue par rapport à la personne couchée ou assise, etc.
- éclairage naturel, orientation Est à Sud de préférence et possibilité d'occultation.

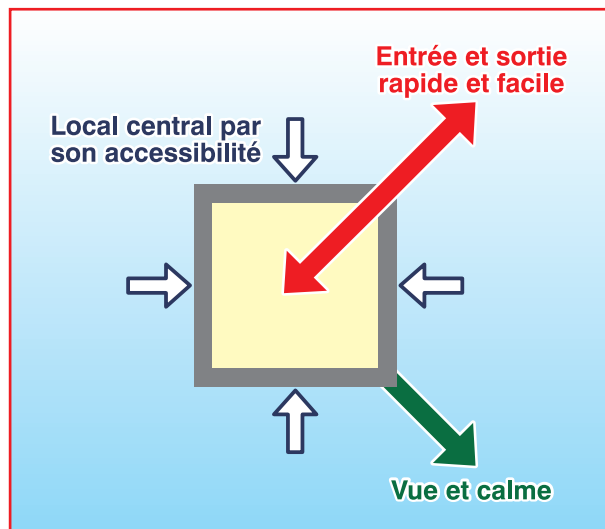
2. Faciliter l'évacuation de blessés ou de malades doit répondre à une double préoccupation :

- la rapidité (proche des lieux de sortie) sans obstacles permanents ni temporaires et avec la possibilité permanente de stationnement d'un véhicule de secours ;
- la discrétion vis-à-vis des autres occupants du bâtiment : il ne faut pas que l'enlèvement d'un blessé (tant pour lui-même que pour les autres usagers) ne se fasse à travers une circulation courante.

Pour l'habitat collectif, les circulations et l'agencement des salles d'eau (d'une partie, au moins, du ou des logements), devront par des dimensions plus généreuses, faciliter les soins à domicile, et/ou le déplacement et la vie d'occupants handicapés, leur permettant ainsi le maintien à domicile.

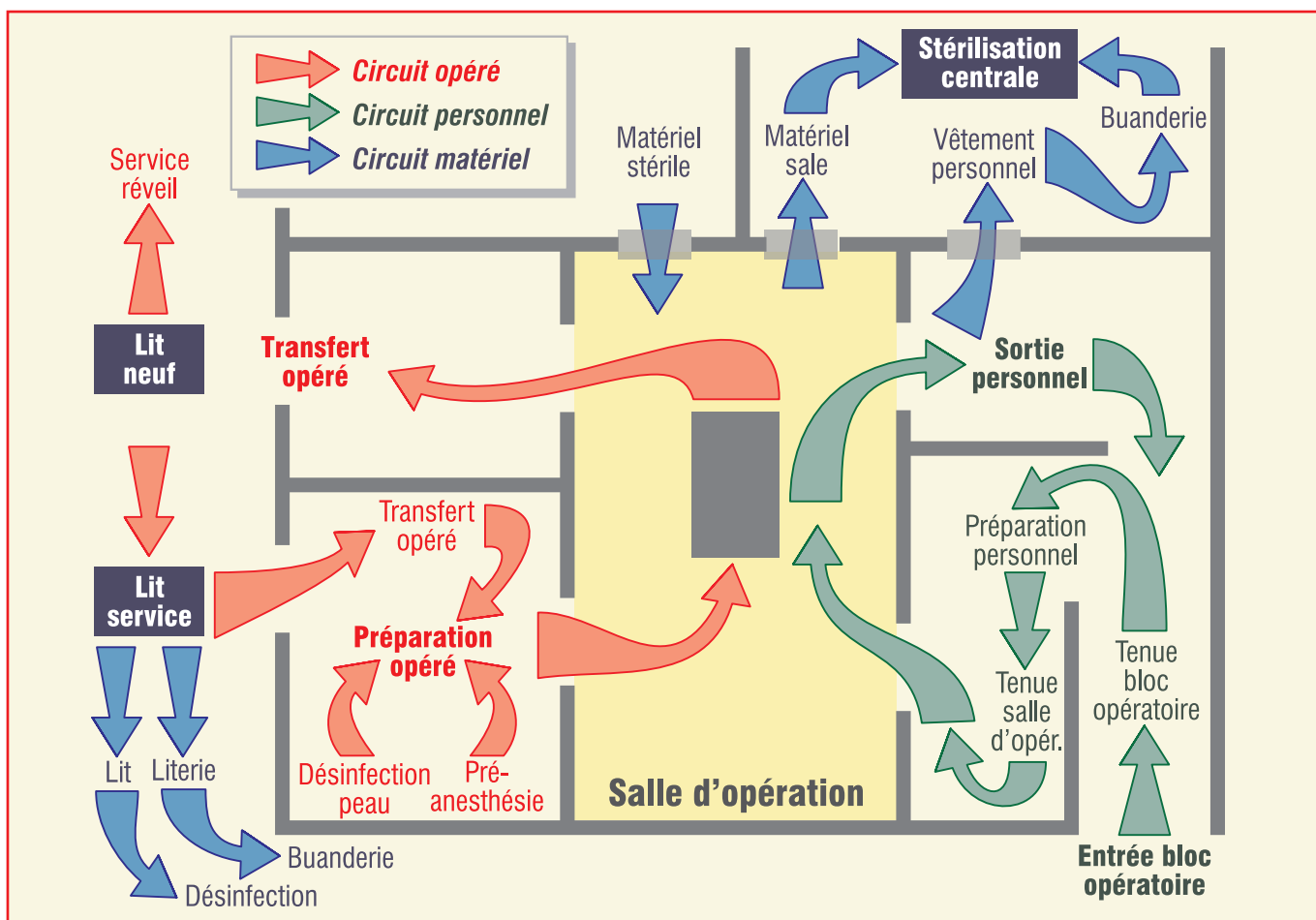
La conception de ces locaux doit en plus permettre un entretien facile : sols et murs lessivables à grande eau, désinfection facile (supports non poreux).

Faciliter les soins de santé rejoint la problématique générale de qualité sanitaire des espaces, dans le but d'améliorer la santé publique.



Création d'une sortie rapide et discrète pour l'efficacité des soins et la tranquillité du malade.

1



2 Exemple de disposition des locaux pour un bloc opératoire avec cheminement de l'opéré, du personnel et du matériel.

Rappelons que nous respirons plus de 480 litres d'air chaque heure et qu'un européen moyen passe plus de 80 % de son temps dans des espaces confinés, principalement son domicile, le bureau et la voiture.

La qualité de l'air, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, est donc capitale pour la santé de l'homme et son bien-être. Si l'étude des pollutions intérieures est une priorité en matière de santé publique, le défi scientifique reste de taille. Les combinaisons multiples entre des polluants de plus en plus variés, d'origines diverses, à émissions permanentes ou temporaires (figure 2), ainsi que la diversité des modes d'occupation, des caractéristiques génétiques... font qu'il reste difficile encore aujourd'hui d'identifier l'origine exacte des malaises que peuvent subir les habitants du bâtiment concerné. À ces obstacles scientifiques, s'ajoute le fait qu'il reste particulièrement difficile d'obtenir auprès des industriels la composition exacte des produits utilisés dans le secteur de la construction. Faute d'informations claires, les architectes et les ingénieurs se doivent de gérer au mieux ces risques environnementaux et d'appliquer autant que possible le "principe de précaution" lors de la rédaction des prescriptions techniques.

D'une manière générale, on distingue deux principaux modes d'émissions polluantes provenant des produits de construction :

- les particules solides telles que les fibres issues des matériaux d'isolation ;
- les composés organiques volatils et les aldéhydes (figure 2).

En ce qui concerne les fibres issues des matériaux d'isolation, le risque semble aujourd'hui maîtrisé par la plupart des fabricants européens de laine minérale puisque, tests de laboratoire à l'appui, ils répondent aujourd'hui tous à la directive européenne 97/69/EC de décembre 1997 et sont exonérés de classification "cancérogène de catégorie 3". Pour les fibres végétales, bien qu'elles semblent avoir de nombreux intérêts environnementaux, les résultats fournis par les études épidémiologiques ne sont pas suffisants pour tirer des conclusions fiables.

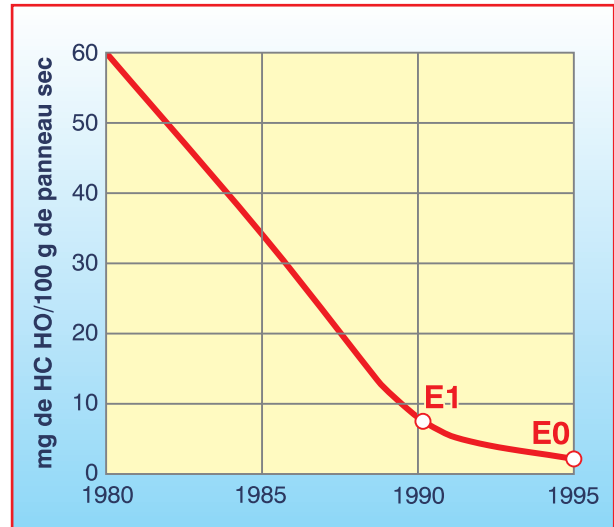
En ce qui concerne les émissions gazeuses, le formaldéhyde est le plus répandu des polluants intérieurs des bâtiments. Composante de résines synthétiques, il est utilisé principalement pour la fabrication des panneaux de particules ou MDF. Il peut provoquer une irritation des yeux, des muqueuses et de la gorge et peut être source de maux de tête. Il est donc recommandé d'utiliser des panneaux répondant au label E1, contenant moins de 10 g de HCHO pour 100 g de panneaux secs (figure 1).

Les mesures de pollutions intérieures révèlent également d'importantes concentrations en éthers de glycol provenant des peintures. Ils sont utilisés comme solvants, notamment dans les peintures à phase aqueuse. Selon une étude de l'Inserm en France, les éthers de glycol peuvent avoir des effets importants sur la santé humaine tels que des malformations congénitales.

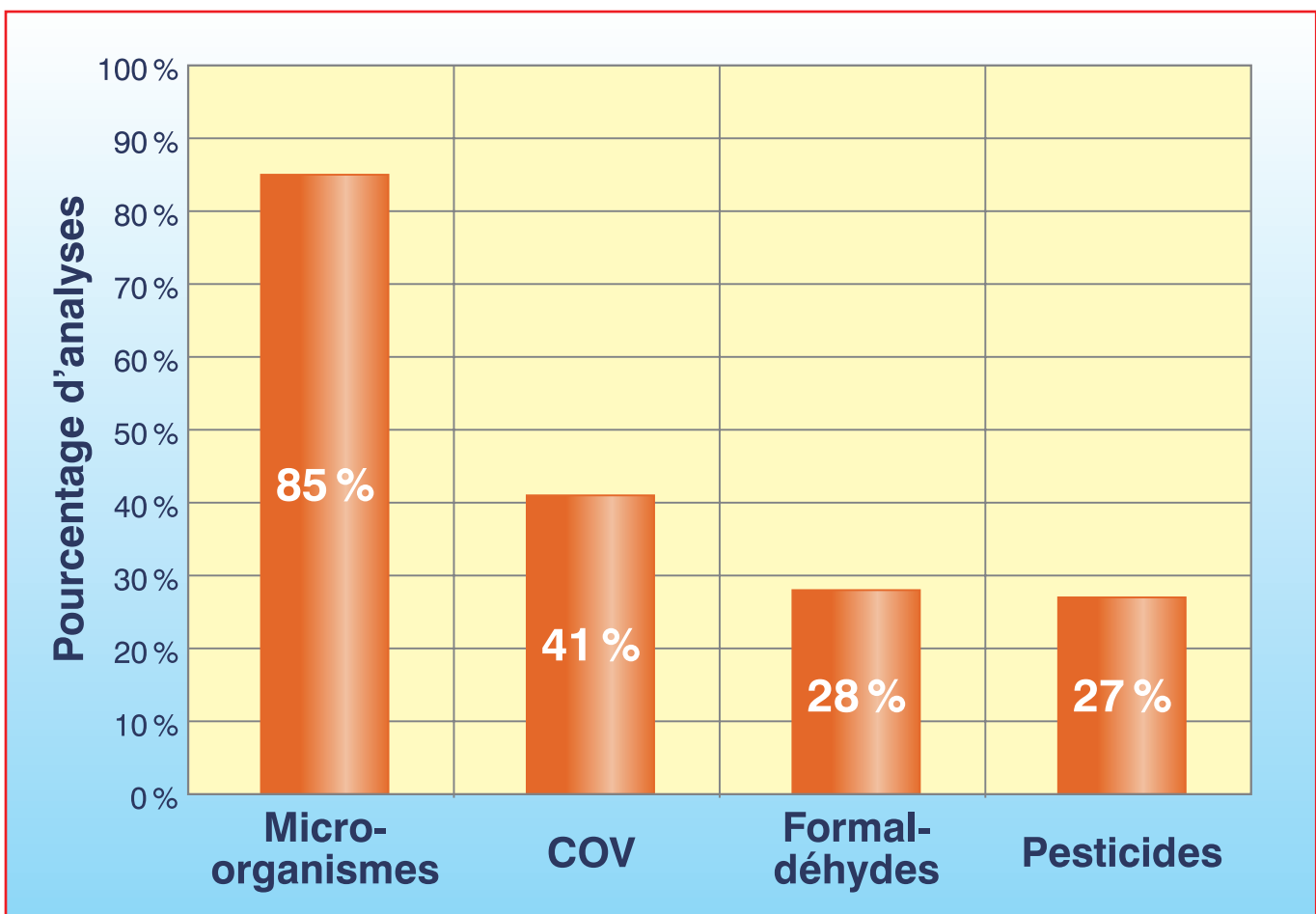
Les industries de la construction sont conscientes de ces questions et souhaitent qu'une déclaration normalisée puissent faire une plus grande transparence sur les produits de construction. Rappelons que la directive européenne 89/109/CE appelée "Produits de construction" va dans ce sens et demande que les produits de construction répondent à 6 exigences dont notamment l'hygiène et la santé, mais aussi l'environnement, la protection contre le bruit, les économies d'énergie et l'isolation thermique.

Pour diminuer au maximum les concentrations de polluants volatils à l'intérieur du bâtiment, il peut être utile de prévoir pendant une dizaine de jours une ventilation forcée des locaux au moment de la réception ou avant la mise à disposition des lieux.

La pollution de l'air intérieur par les peintures, colles, panneaux de contreplaqués... peut être à l'origine de nombreuses affections allergiques et respiratoires ainsi que de troubles neuro-comportementaux ou de cancers environnementaux.



Taux d'émissions de formaldéhyde pour les panneaux de particules (EPFL) **1**



2 De nombreuses sources de pollutions à l'intérieur de nos bâtiments (ADEME).

Les pollutions dues aux équipements mis en œuvre dans les bâtiments sont tout aussi variées que celles provenant des produits de construction. Elles sont pour la plupart également encore mal connues. Toutefois, contrairement aux matériaux de construction, la qualité technique des équipements s'est largement améliorée, limitant ainsi les risques sanitaires. Leur entretien devient par contre primordial pour éviter tout désordre technique.

Le monoxyde de carbone est ainsi régulièrement mentionné. Gaz extrêmement dangereux, il est inodore, insipide et invisible. Produit par un appareil de chauffage ou un chauffe-eau défectueux ou mal entretenu, il tue encore aujourd'hui plusieurs milliers de personnes par an en Europe. Pourtant, des solutions simples peuvent être prévues pour éviter tout risque :

- prévoir une grille de ventilation d'entrée d'air pour assurer une combustion complète du combustible ;
- prévoir une évacuation suffisante des produits de combustion par une cheminée ;
- prévoir un détecteur de CO avec différents niveaux d'alarme (figure 1).

Notons que même une faible exposition au monoxyde de carbone peut avoir des effets graves sur la santé des occupants : une concentration de 1 % en volume est mortelle.

D'après les études menées par l'IFID et le Dr Lorenz à Düsseldorf en Allemagne sur 500 habitations (figure 2), les micro-organismes peuvent être considérés comme le polluant le plus répandu. Bien que cette étude ne permet pas de démontrer la cause de ce problème, l'accumulation de poussières, de moisissures ou de bactéries favorise le développement des micro-organismes directement dans le système de ventilation et leur dispersion ensuite dans les locaux. L'entretien et la maintenance des équipements de ventilation par les occupants est ici en cause. Outre leur propreté, il est essentiel qu'un entretien régulier soit opéré pour vérifier qu'il n'y a pas de déséquilibre des débits d'air, de dérèglement des équipements de régulation, de détérioration de l'étanchéité des gaines... modifiant les caractéristiques de l'air intérieur.

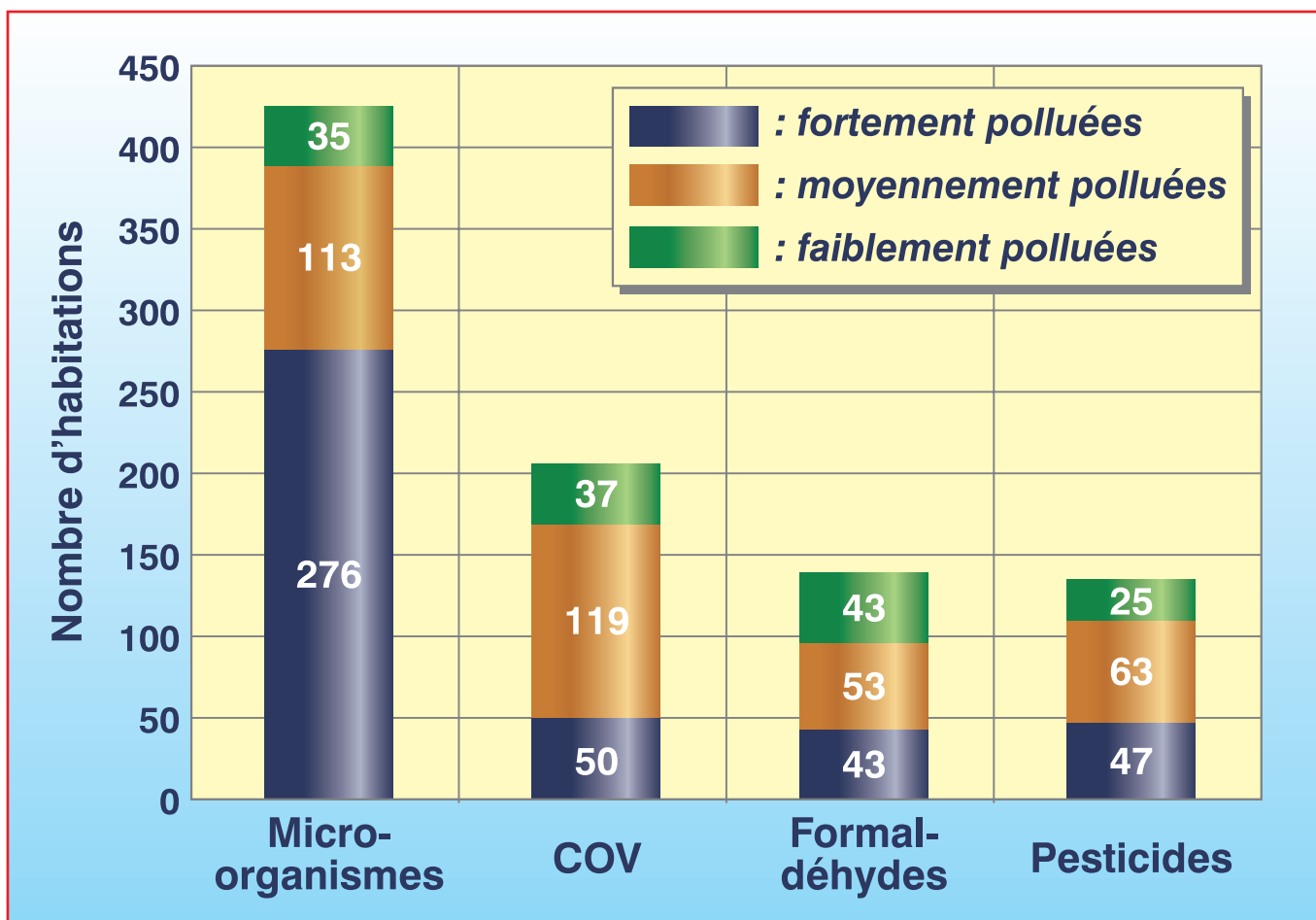
La maintenance des équipements de chauffage et de ventilation est donc primordiale pour limiter tout risque sanitaire dû à un fonctionnement anormal. Pour faciliter ces opérations d'entretien et de maintenance, la faisabilité des interventions doit être appréhendée par l'équipe de maîtrise d'œuvre dès la conception du projet. L'équipe de maîtrise d'œuvre doit donc porter toute son attention aux aspects suivants :

- faciliter les opérations de nettoyage des gaines de ventilation pour empêcher que la qualité de l'air soit affectée par les dépôts de poussières ;
- faciliter les opérations de contrôle par des trappes d'accès permettant de mesurer les débits, les pressions et les températures d'air.

Les sources de pollutions intérieures provenant des équipements techniques sont tout aussi variées que celles issues des produits de construction : micro-organismes, monoxyde de carbone...



Détecteur de monoxyde de carbone ¹
(Littoclime).



² Répartition des principaux polluants dans 500 habitations situées en Allemagne (1999) (Sandrine 2).

Si nous sommes aujourd'hui fréquemment exposés aux rayonnements ionisants artificiels produits par les activités humaines (médecine nucléaire, énergie nucléaire, essais atomiques...), les expositions naturelles (rayonnement cosmique, radon, sol...) ne peuvent être négligées, car elles sont responsables de la plus grande partie des radiations absorbées par l'homme. Le gaz radon constituerait à lui seul la principale source de radioactivité en Europe.

Gaz incolore, inodore et insipide provenant du sous-sol, le radon se propage, après désintégration de l'uranium présent dans le sol, au travers des porosités du sol et du sous-sol. Aspiré dans les bâtiments par effet de cheminée, il se concentre ensuite dans les espaces confinés mal ventilés. Comme il ne peut être perçu par nos sens (nous ne le voyons pas, nous ne le ressentons pas, ni ne le sentons !), la plupart des personnes ne sont pas conscientes de l'exposition subie journallement et du risque encouru.

Au vu des connaissances scientifiques actuelles, l'Organisation Mondiale de la Santé relève que le radon représente un problème majeur pour la santé, qu'il est indirectement cancérigène pour l'homme et que l'incertitude concernant l'évaluation du risque est moindre que pour d'autres facteurs cancérigènes. La Commission européenne a donc fixé, comme mesures d'hygiène, des valeurs limites de concentration de l'ordre de 200 Bq/m³ pour les bâtiments à construire et 400 Bq/m³ pour toutes rénovations (cf recommandation européenne 90/143/Euratom). Toutefois, il convient de rappeler que toute exposition au radon, peu importe son niveau, constitue en soi un facteur de risque du point de vue de la santé.

En fait, ce n'est pas le radon en tant que tel qui est directement dangereux pour la santé, mais ses produits de désintégration radioactifs constitués par certains isotopes du plomb, du bismuth et du polonium qui en se déposant dans les voies respiratoires irradient directement les poumons. Responsables de nombreux cas de cancers du poumon déclarés, le radon et ses descendants de désintégration constitueraient la deuxième cause de cancer du poumon, juste après le tabac.

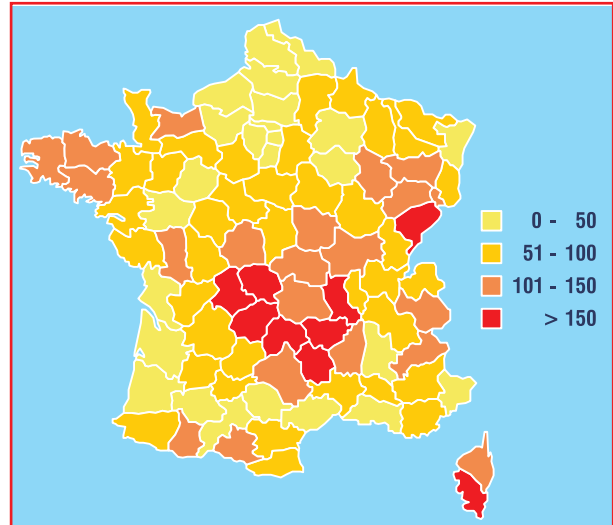
Comme le montre la figure 2, des mesures préventives ou correctives peuvent être entreprises selon le cas lors de la construction ou de la rénovation d'un bâtiment :

- étanchéification à l'air des parois du bâtiment en contact direct avec le sol (y compris les passages de canalisations !)
- ventilation efficace par mise en légère surpression des locaux ;
- drainage par mise en dépression du sol sous-jacent au bâtiment.

Ces mesures ne sont à mettre en œuvre qu'après avoir estimé objectivement le risque encouru en fonction des données locales ou relevés effectués sur le site.

D'une manière générale, les zones à risques sont riches en granit ou en schiste. En France, la figure 1 montre que les concentrations moyennes les plus élevées (supérieures à 150 Bq/m³) concernent les cinq départements français suivants : la Corrèze, la Creuse, le Finistère, la Loire et la Haute-Vienne.

Le radon est un gaz radioactif naturel, inodore et incolore, issu du sol et susceptible de provoquer le cancer du poumon.



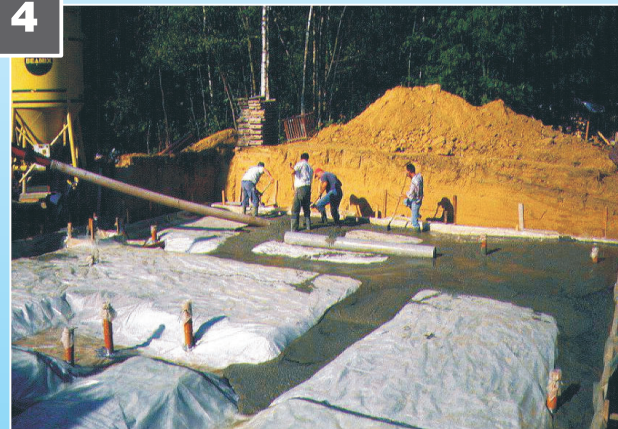
Concentration atmosphérique du radon en Bq.m⁻³ (Institut de protection et de sûreté nucléaire). **1**



1 2



3 4



2 Étanchéification et drainage du sol (Centre Scientifique et Technique de la Construction – Belgique).

L'air est un mélange gazeux contenant essentiellement de l'azote, de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Les proportions entre ces composés définissent la qualité de l'air que nous respirons (14 kg d'air par jour). Ainsi, bien que le CO₂ représente finalement moins d'un demi-pour-cent de la composition de l'air, la moindre fluctuation est immédiatement perçue par notre organisme et modifie l'équilibre fragile de la qualité de l'air.

Cet équilibre est largement fragilisé par la pollution de l'air extérieur produite par les transports, les activités industrielles et le chauffage des bâtiments. Les émissions de polluants atmosphériques sont extrêmement variables tant en quantité qu'en nature. On distingue généralement deux types de polluants :

- les polluants primaires émis directement dans l'atmosphère telles que le dioxyde de soufre (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂), les particules en suspension ;
- les polluants secondaires qui sont à l'origine des pluies acides et de la pollution photochimique : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'ozone (O₃). Ils proviennent de la modification chimique des polluants primaires.

Le dioxyde de soufre (SO₂) provient essentiellement du fuel ou du charbon, combustibles fossiles contenant du soufre. Le soufre émis forme avec la vapeur d'eau l'acide sulfurique qui augmente le potentiel d'acidification des pluies et contribue à la destruction des forêts et à la dégradation des façades en pierres des bâtiments anciens. Sur le plan de la santé, le dioxyde de soufre provoque des problèmes respiratoires chez l'homme.

Le dioxyde d'azote (NO₂) provient principalement du transport et des installations de combustion. Il contribue à la fois à la formation de l'ozone et au phénomène des pluies acides. Sur l'homme, il augmente la sensibilité des bronches.

Les poussières proviennent de la combustion. Elles ont principalement des effets sur la santé de l'homme : irritations des voies respiratoires, effets mutagènes et cancérogènes.

L'ozone provient de la transformation photochimique (figure 2) de polluants tels que les NO_x et les composés organiques volatils (COV). Il contribue largement aux pollutions "photo-oxydantes" ainsi qu'indirectement à l'effet de serre et aux pluies acides. Sur l'homme, il peut provoquer des altérations pulmonaires.

La dispersion des polluants de l'air extérieur dépend de plusieurs facteurs :

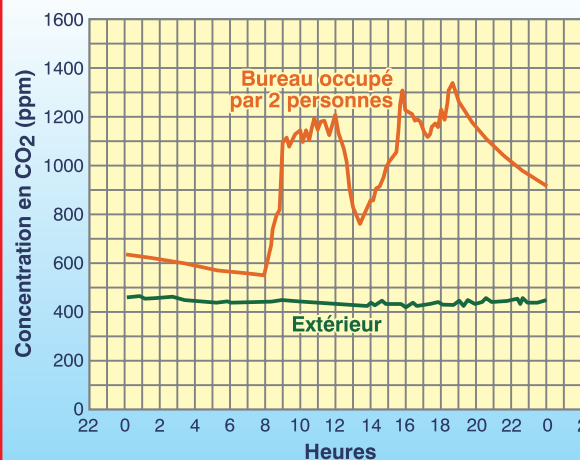
- la turbulence atmosphérique ;
- la morphologie urbaine (avenue aérée, cœur d'îlot...) ;
- le vent ;
- la température.

Cependant, les concentrations qui peuvent être mesurées localement ne dépendent pas forcément des sources de pollutions produites à proximité. Les risques de propagation de la pollution atmosphérique vers nos habitations ne dépendent pas uniquement du milieu dans lequel on se trouve et des conditions météorologiques extérieures. Les polluants se propagent rapidement et ne connaissent pas de frontières. À titre d'exemple, en milieu urbain, c'est souvent les périphéries urbaines qui subissent les plus fortes concentrations alors que les sources de pollutions sont localisées en milieu urbain.

Les contre-mesures dépendent essentiellement des restrictions prises à d'autres échelles que celle du bâtiment, les architectes et les ingénieurs ont réellement peu de marge de manœuvre pour maîtriser l'introduction de polluants à l'intérieur des bâtiments. Il n'est pas réaliste de concevoir un bâtiment comme un espace étanche où l'on approvisionnait de manière artificielle l'air intérieur. Il est par contre possible d'essayer de capter l'air frais hors des zones à risques (rues à forte circulation, cheminées...) et de mettre en légère surpression le bâtiment pour éviter toute infiltration d'air pollué à l'intérieur. De manière exceptionnelle, il peut éventuellement être envisagé de filtrer l'air extérieur et d'éliminer les poussières. Il est par contre impossible de modifier la composition chimique de l'air capté à l'extérieur du bâtiment et de limiter les concentrations excessives de monoxyde de carbone, de dioxyde d'azote ou de soufre.

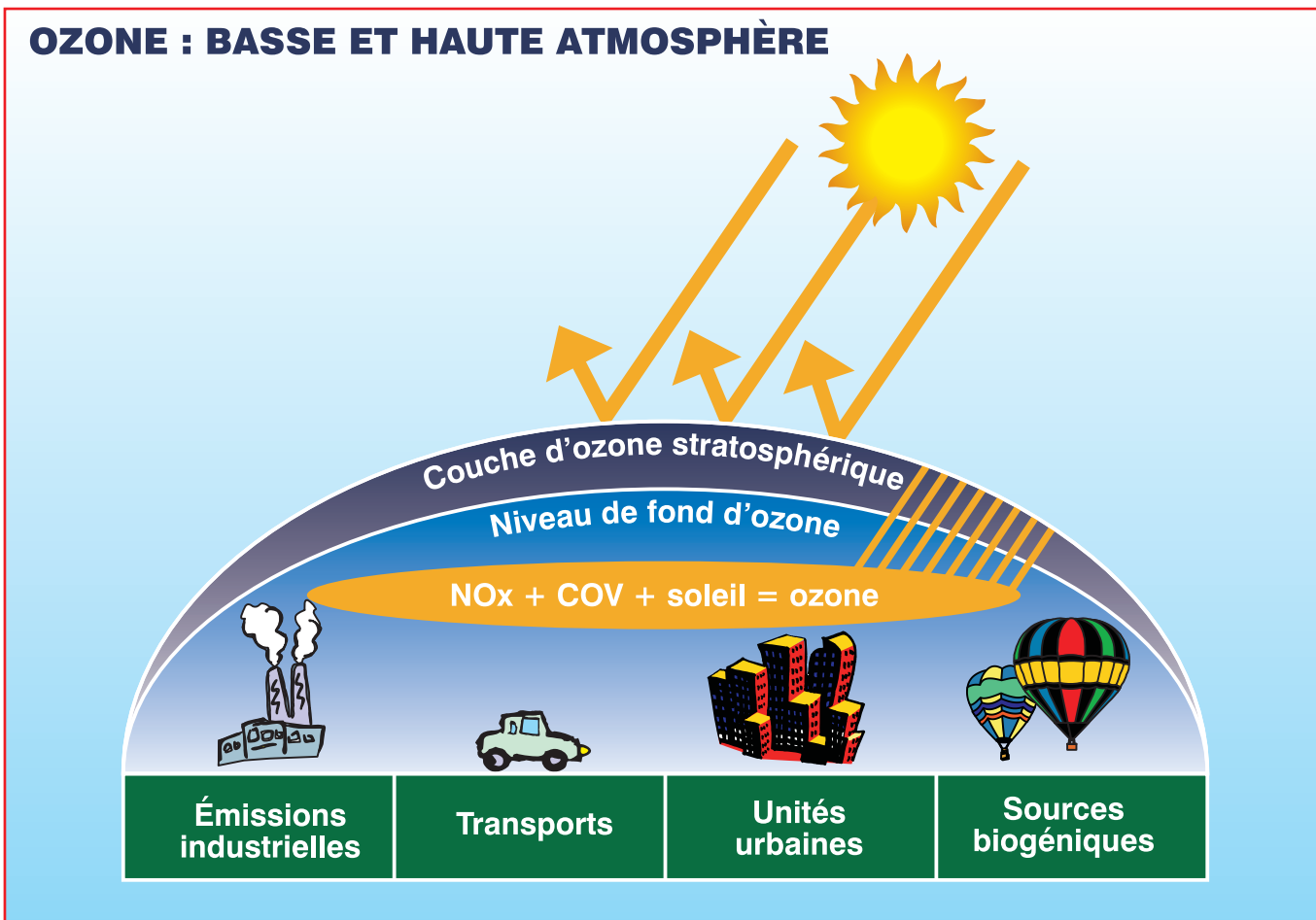
Pour faire face aux problèmes de qualité de l'air que nous rencontrons quotidiennement en Europe, la Commission européenne a lancé une stratégie commune appelée "Air pur pour l'Europe" et s'appuie sur les directives déjà adoptées : directive-cadre 96/62/CE du Conseil concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant, directive 99/30/CE fixant des valeurs limites pour le SO₂, le NO_x, le plomb et les particules, directive 2000/69/CE fixant des valeurs limites pour le monoxyde de carbone et le benzène.

L'air est un mélange gazeux contenant essentiellement de l'azote, de l'oxygène et de la vapeur d'eau.



Évolution de la concentration en CO₂ dans un bureau occupé par 2 personnes (CSTC - Centre Scientifique et Technique de la Construction).

OZONE : BASSE ET HAUTE ATMOSPHÈRE



2 La pollution atmosphérique par l'ozone (ADEME).

Le renouvellement de l'air est indispensable pour assurer un climat intérieur sain aux occupants. L'apport d'air neuf permet d'évacuer les polluants qui se sont accumulés dans les locaux et qui proviennent :

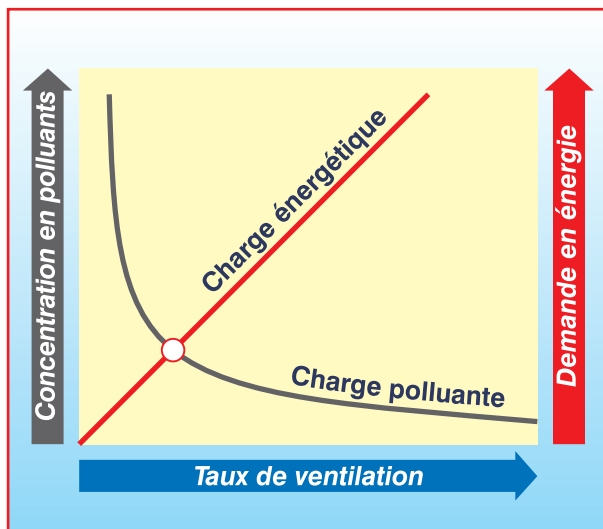
- des occupants :
 - la vapeur d'eau (environ 50 grammes/heure/personne) ;
 - les odeurs corporelles ;
 - le dioxyde de carbone (environ 18 litres/heure/personne) ;
- des activités :
 - l'ozone provenant des photocopieuses et des imprimantes laser ;
 - la fumée de tabac ;
 - le monoxyde de carbone provenant d'un dysfonctionnement d'un équipement à combustion ;
- des matériaux de construction :
 - le formaldéhyde provenant de certaines mousses isolantes et des panneaux de bois aggloméré ;
 - les composés organiques volatiles émis par les matériaux de finition ou par les produits d'entretien ;
 - les poussières et les fibres ;
- de l'extérieur :
 - les polluants urbains provenant du trafic ;
 - les moisissures ;
 - le radon ;
 - les pollutions industrielles ;
 - les pollutions rurales telles que les pollens.

Si le renouvellement de l'air est indispensable pour maîtriser la qualité de l'air intérieur, il entraîne cependant des pertes thermiques non-négligeables. Pour limiter ces pertes, l'apport d'air neuf doit être maîtrisé en fonction des besoins réels : « Aérer n'est pas ventiler » (figure 2). Pour trouver le point d'équilibre entre les pertes thermiques et la charge polluante (figure 1), la mise en œuvre d'une régulation de la ventilation, d'équipements performants et de gaines de ventilation étanche s'impose. Différents systèmes de ventilation permettent de répondre à cette double exigence :

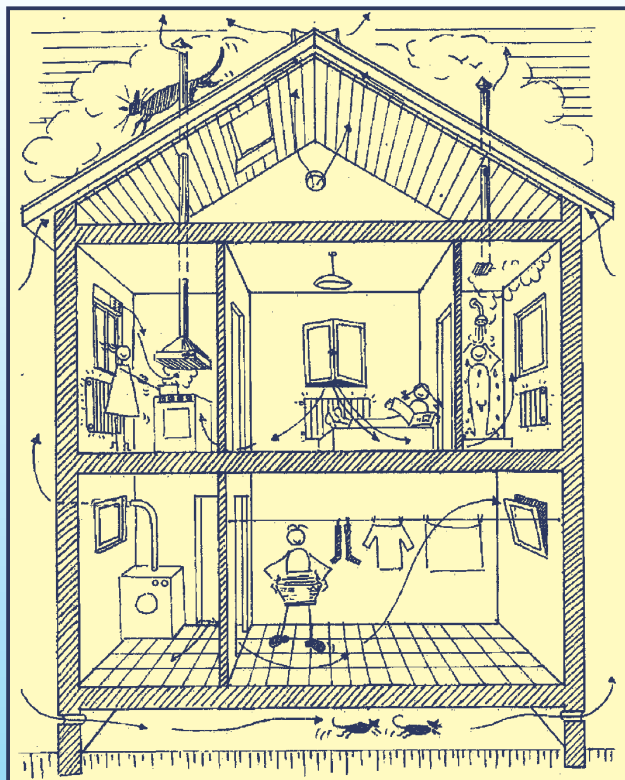
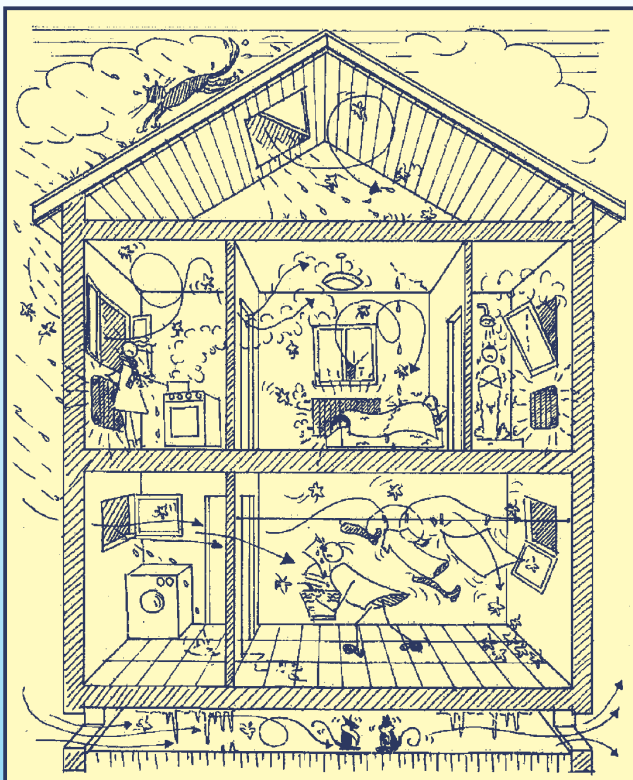
- ventilation mécanique simple flux permettant d'insuffler de l'air neuf ou d'extraire l'air pollué. Le bâtiment peut être mis ainsi en surpression ou en dépression. Les polluants sont évacués des pièces de vie vers les locaux de service puis évacués à l'extérieur. Il peut parfois être intéressant de mettre le bâtiment en légère surpression pour éviter l'infiltration de polluants comme le radon par exemple ;
- ventilation mécanique double flux permettant à la fois d'insuffler l'air neuf et d'extraire l'air vicié. Combiné à un échangeur de chaleur statique ou rotatif, ce dispositif permet de récupérer les calories extraites en hiver et donc de réaliser des gains énergétiques importants tout en optimisant grâce au préchauffage de l'air frais le confort des occupants.

Ces deux principaux systèmes peuvent être régulés en fonction des besoins par des sondes CO₂, des détecteurs de présence, ou grâce à des grilles de ventilation hygroréglables s'ouvrant en fonction du taux d'humidité intérieure.

Le renouvellement de l'air est indispensable pour assurer un climat intérieur sain aux occupants.



Le point d'équilibre du renouvellement d'air (LESO - EPFL). **1**



2 Aérer n'est pas ventiler (LESO - EPFL).

La qualité de l'eau potable passe nécessairement par une double exigence : sanitaire et de goût. Nous avons la chance en Europe de pouvoir disposer d'une eau potable qui répond à ces deux exigences.

La qualité sanitaire de l'eau potable fait l'objet de réglementations européennes et nationales strictes et de contrôles réguliers garantissant la potabilité de l'eau tout au long de son cycle, depuis la production jusqu'à sa distribution (figure 2). Les doses maximales admissibles (DMA) définissent des seuils de qualité et de potabilité qui permettront à chaque individu d'assimiler quotidiennement l'eau du robinet sans danger tout au long de sa vie.

L'Union européenne a ainsi adopté en novembre 1998 la directive 98/83/CE portant sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et imposant à tous les pays membres des normes de qualité et des obligations de contrôle. Cette nouvelle directive rentrera en application le 25 décembre 2003 et modifie la directive 80/778/CE. Elle prend en compte les recommandations émises par l'Organisation Mondiale de la Santé. Renforçant la sécurité sanitaire, la qualité de l'eau ne sera plus ainsi évaluée au départ du réseau privatif, mais directement au robinet de l'utilisateur. La teneur en plomb sera ainsi fortement réduite.

En France, d'ici à 2003, l'eau potable doit répondre à 63 critères répartis en 7 catégories :

- paramètres organoleptiques : coloration, turbidité, odeur, saveur ;
- paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux : présence de chlore, de sulfate, de magnésium, de potassium... ;
- paramètres concernant des substances "indésirables" : présence de fluor, de nitrates, d'hydrocarbures... ;
- paramètres concernant des substances toxiques : le chrome, le plomb, l'arsenic, le cadmium... ;
- paramètres microbiologiques concernant le risque bactériologique : parasites, virus, bactéries pathogènes telles que salmonelles, staphylocoques ou streptocoques... ;
- pesticides et produits apparentés ;
- paramètres concernant les eaux adoucies livrées à la consommation humaine : dureté et alcalinité.

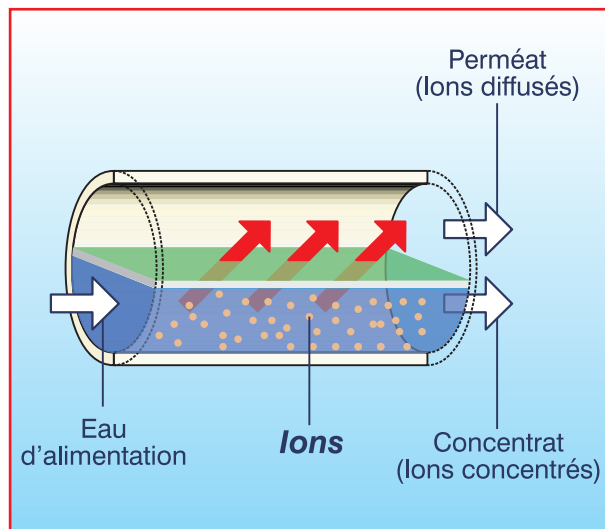
Si l'eau est strictement contrôlée jusqu'au compteur, aucun contrôle n'est actuellement effectué pour le réseau d'eau privatif. Le plomb est ainsi un bel exemple de facteur à risques provenant d'anciennes canalisations.

Bien que l'eau du robinet est généralement de très bonne qualité en Europe, son goût peu parfois pousser certains consommateurs à équiper leurs robinets de filtres. Il existe à l'heure actuelle plusieurs types de filtrations :

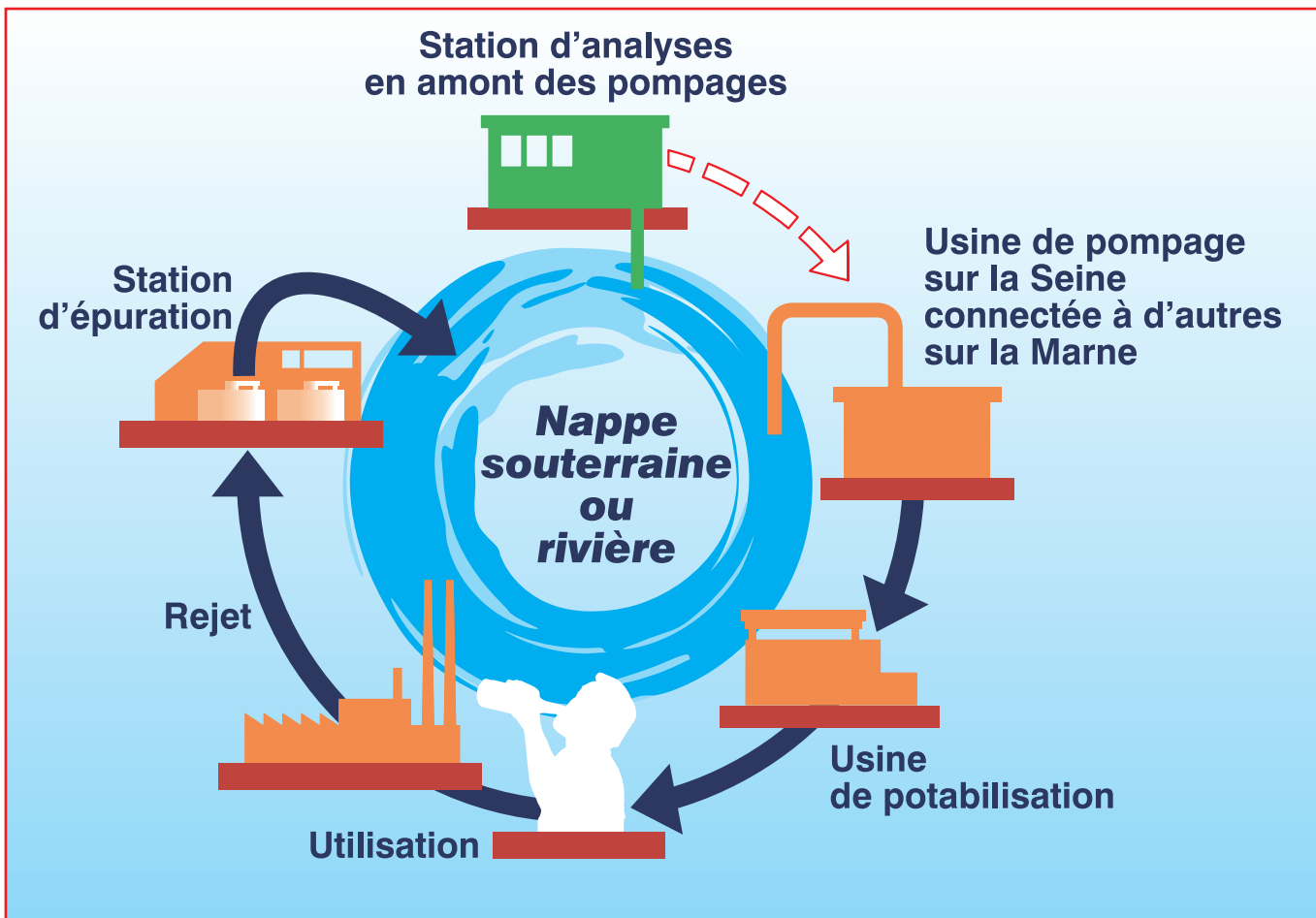
- filtres à charbon actif diminuant les concentrations en polluants organiques telles que les trihalométhanes, les composés chlorés ou les pesticides ;
- filtres à échanges d'ions pour réduire les concentrations en nitrates et ions métalliques (figure 1) ;
- filtres à osmose inverse éliminant les minéraux tels que les sels de sodium, de fer, de magnésium, de potassium, les fluorures, les nitrates et le plomb. La charge minérale est réduite à 85 – 90 %.

Toutefois, il convient d'être extrêmement vigilant avec l'utilisation de ces filtres. Un mauvais usage ou un entretien irrégulier peut aboutir à l'effet inverse et avoir des conséquences graves sur la santé.

La qualité de l'eau potable passe nécessairement par une double exigence : sanitaire et de goût.



1 Filtre pour purifier l'eau (d'après E. Dufrasnes).



2 Le cycle de l'eau potable en Île de France (ARENE).

C'est en 1976 que l'on diagnostiqua pour la première fois une épidémie de pneumonie qui avait touché à Philadelphie d'anciens légionnaires de l'armée américaine. Les enquêtes épidémiologiques qui furent menées ensuite permirent de mettre à jour une bactérie encore inconnue : la "légionella pneumophila". Cette bactérie se serait propagée dans le système de climatisation de l'hôtel qui hébergeait les vétérans venus pour leur congrès annuel.

Touchant principalement les personnes âgées ou immunodépressives, la légionellose existe sous deux formes : la fièvre de Pontiac (forme bénigne similaire à une grippe) et la maladie du Légionnaire (infection pulmonaire qui peut être mortelle dans certains cas).

Les légionelles existent naturellement en quantité très faible dans les eaux souterraines et dans l'eau de distribution publique. Se propageant ensuite dans les réseaux d'eau chaude sanitaire (bains bouillonnants, douches...) ou dans les installations de climatisation, les légionelles se développent à des températures comprises entre 25°C et 50°C. La contamination à l'homme s'effectue finalement par voie aérienne par l'inhalation d'eau diffusée sous formes d'aérosols ou de micro-gouttelettes.

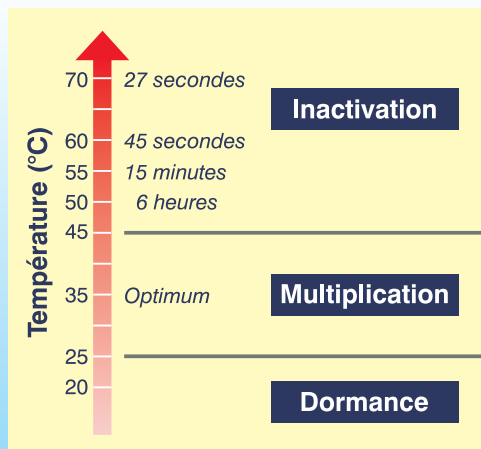
Pour limiter le développement des légionelles, des mesures préventives doivent être prises à la fois par l'équipe de maîtrise d'œuvre lors de la conception et par les gestionnaire ou les occupants en cours d'exploitation :

- prévoir des réseaux d'eau en "boucle courte" limitant les bras morts ;
- choisir des canalisations pouvant résister à des températures élevées et à la corrosion (ex : cuivre) ;
- entretien et maintenance régulier des réseaux d'eau et des systèmes de climatisation ;
- maintien de la température des ballons d'eau chaude à plus de 60°C.

Ce risque sanitaire concerne en priorité les milieux hospitaliers (cliniques, maisons de retraite, centres thermaux...) ainsi que les bâtiments occupés de manière intermittente (résidence secondaire, hôtels...). Il faut savoir que 1 442 cas ont été déclarés en Europe en 1998 avec une incidence de 0,4 cas pour 100 000 habitants.

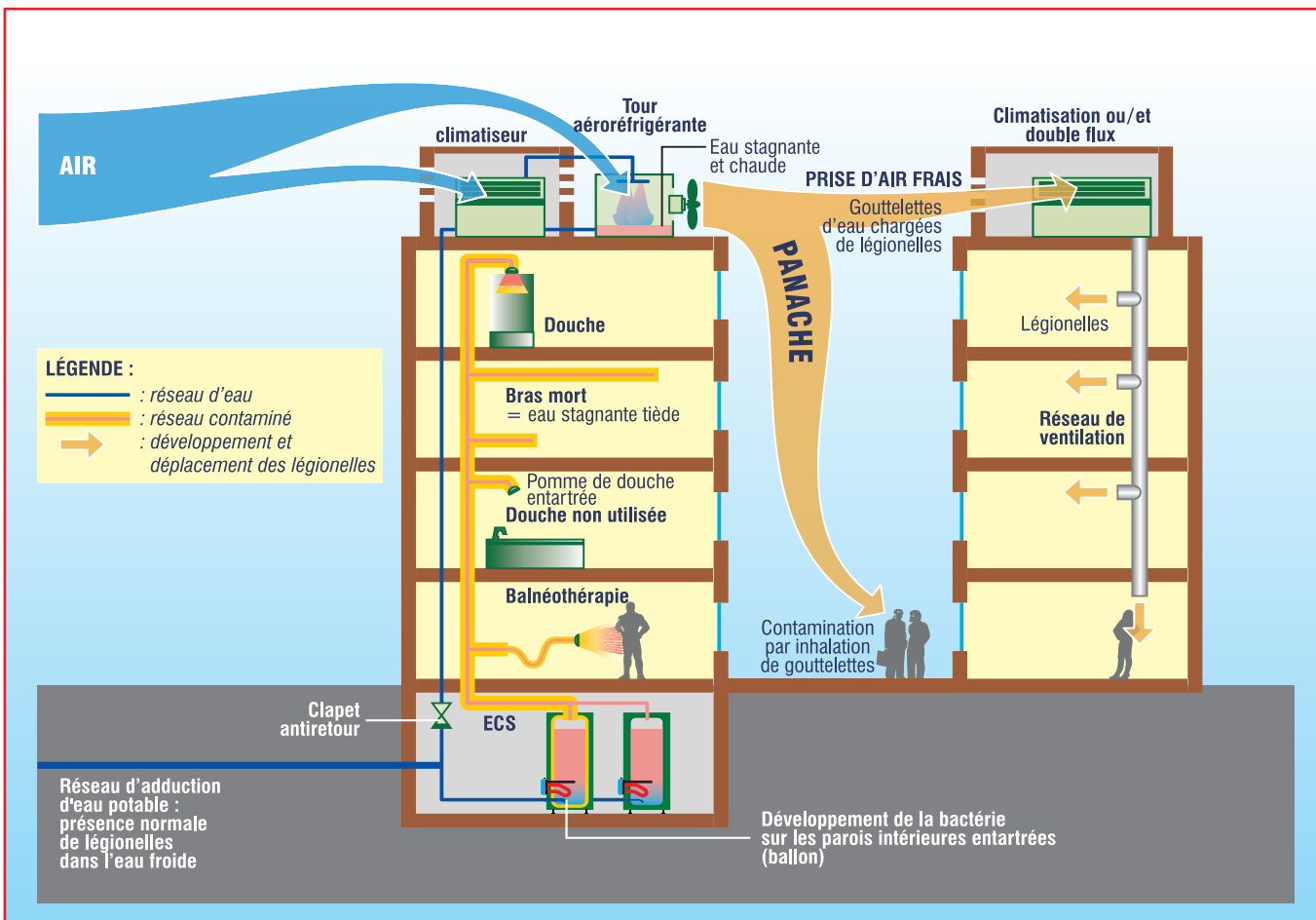
En cas de contamination, deux procédés peuvent être appliqués : le "choc thermique" par élévation de la température de l'eau à plus de 60°C et le "traitement chimique" par chloration des réseaux.

La légionellose est une infection pulmonaire provoquée par des bactéries du type *Légionella* dont le germe responsable est un bacille se propageant dans les réseaux d'eau chaude des bâtiments et dans les systèmes de climatisation. 70 % des équipements collectifs de distribution d'eau chaude contiennent des légionelles.



Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris

Influence de la température sur les légionelles (CSTB – RISE - Réseau International Santé Environnement).



2 Les voies de contamination par les légionelles (*Le Moniteur N°5071*).

Les rayonnements électromagnétiques se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite.

Ils se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde λ .

La figure 1 donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

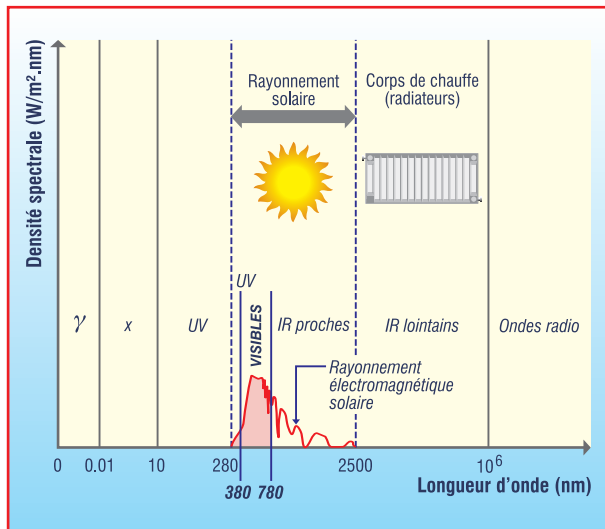
Le spectre solaire

Le rayonnement solaire ne correspond qu'à une partie du spectre des ondes électromagnétiques (figure 1). Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2 , produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut $1\,353\, W/m^2$ et est appelée constante solaire. L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (figure 2a). L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

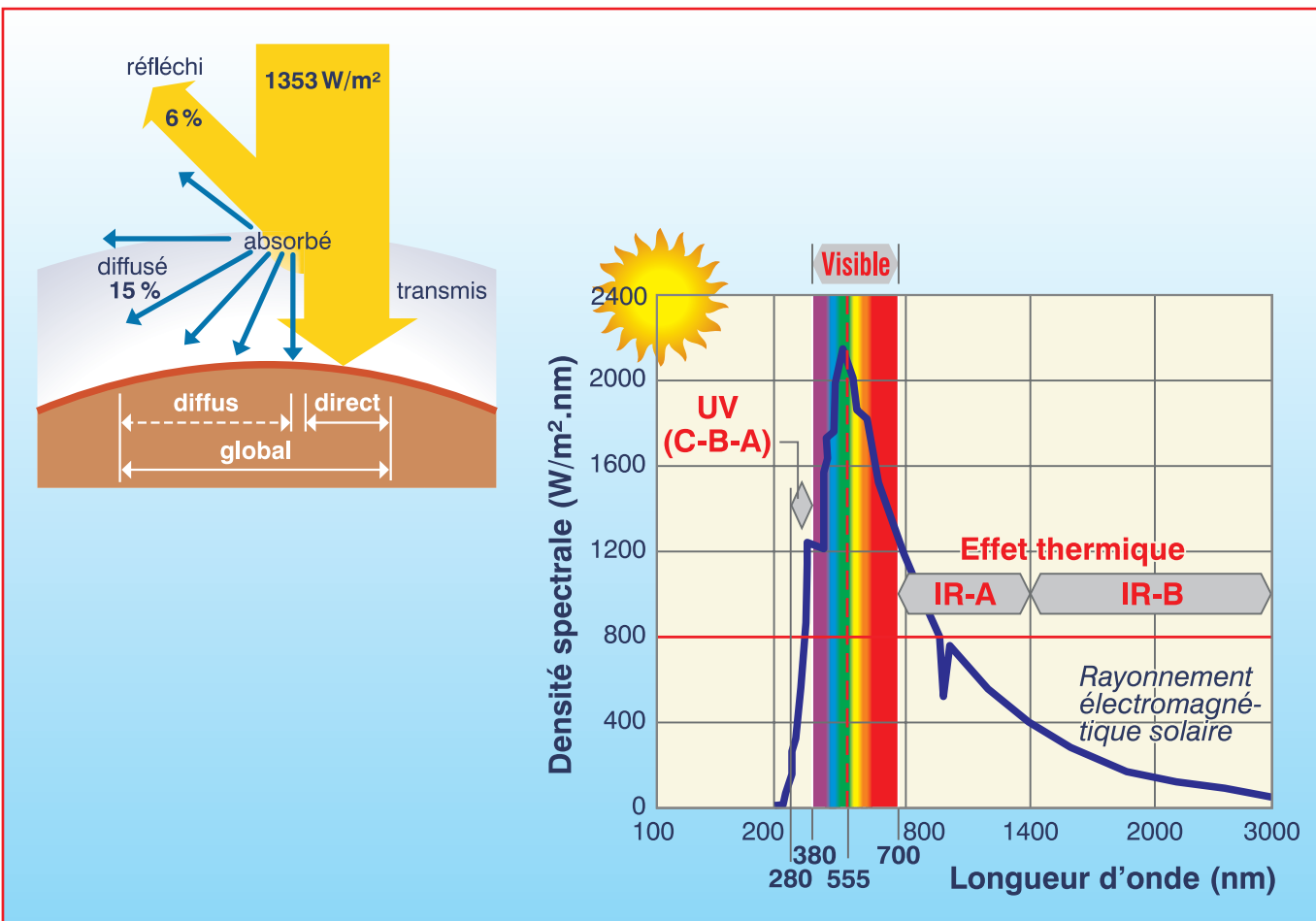
Le spectre solaire se répartit selon trois types de rayonnement (figure 2b) :

- les ultraviolets (UVA et UVB) qui ont une longueur d'onde comprise entre 280 et 380 nm. Ils représentent environ 5 % de la quantité totale du rayonnement solaire ;
- la partie visible du spectre. Il s'agit de la partie du rayonnement solaire compris entre 380 et 700 nm. C'est dans ce domaine visible que l'énergie solaire est la plus intense. Elle représente 50 % de la quantité totale du rayonnement solaire ;
- les infrarouges (IRA et IRB) qui correspondent aux longueurs d'ondes comprises entre 700 et 2 500 nm. Ils représentent environ 45 % du spectre solaire.

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.



Classification des rayonnements électromagnétiques. 1



2 Le spectre solaire.

Le flux lumineux (Φ)

Le flux lumineux Φ d'une source est l'évaluation, selon la sensibilité de l'œil, de la quantité de lumière rayonnée dans tout l'espace par cette source. Il s'exprime en lumen (lm).

L'efficacité lumineuse (η)

L'efficacité lumineuse (ou rendement lumineux) η d'une source est le quotient de son flux lumineux Φ par sa puissance P. Elle s'exprime en lm/W.

$$\eta = \Phi/P \text{ (lm/W)}$$

La puissance P d'une source de lumière naturelle correspond à son flux énergétique (c'est-à-dire la puissance rayonnée par cette source).

La puissance P d'une source artificielle est la puissance électrique consommée. La figure 1 permet de comparer quelques ordres de grandeur de l'efficacité lumineuse de différentes sources de lumière naturelle, pour des inclinaisons du soleil supérieures à 30°.

La répartition spectrale lumineuse

La répartition spectrale lumineuse d'une source, ou spectre lumineux, donne le flux énergétique rayonné dans le domaine visible en fonction de la longueur d'onde.

La figure 2 présente la répartition spectrale, en valeurs relatives (%), du flux lumineux du soleil à une hauteur de 30° reçu sur une surface perpendiculaire à celui-ci et celle d'une lampe à vapeur de sodium basse pression. La lumière naturelle a un spectre continu mais l'éclairage artificiel peut présenter une répartition spectrale discontinue.

La température de couleur (TC)

La température de couleur d'une source est la température à laquelle il faudrait chauffer un corps noir pour qu'il rayonne une lumière dont la couleur serait la plus proche possible de celle de la source considérée. Elle s'exprime en Kelvin (K). Lorsque la température de couleur de la lumière est inférieure à 3 300 K, sa source émet un rayonnement de couleur dite "blanc chaud", c'est-à-dire qu'il contient beaucoup de radiations oranges et rouges. Si la température de couleur de la lumière est supérieure à 5 300 K, son rayonnement est qualifié de "blanc froid", contenant beaucoup de radiations violettes et bleues. Une lampe de température de couleur intermédiaire est dite de couleur blanc neutre.

La température de couleur d'une source lumineuse caractérise principalement l'ambiance lumineuse donnée au local éclairé par cette source. Les teintes froides de la lumière dont la température de couleur dépasse 5 000 K se rapprochent de la lumière naturelle. À titre de comparaison, la figure 1 donne la température de couleur d'une série de sources naturelles.

L'indice de rendu des couleurs (IRC)

La capacité d'une source lumineuse à restituer les différentes couleurs du spectre visible de l'objet qu'elle éclaire est désignée par son indice de rendu des couleurs. L'indice maximum (IRC100) correspond à une source dont la lumière émise rend les couleurs de la même manière que la lumière de référence corps noir ou lumière naturelle selon la TC de la source.

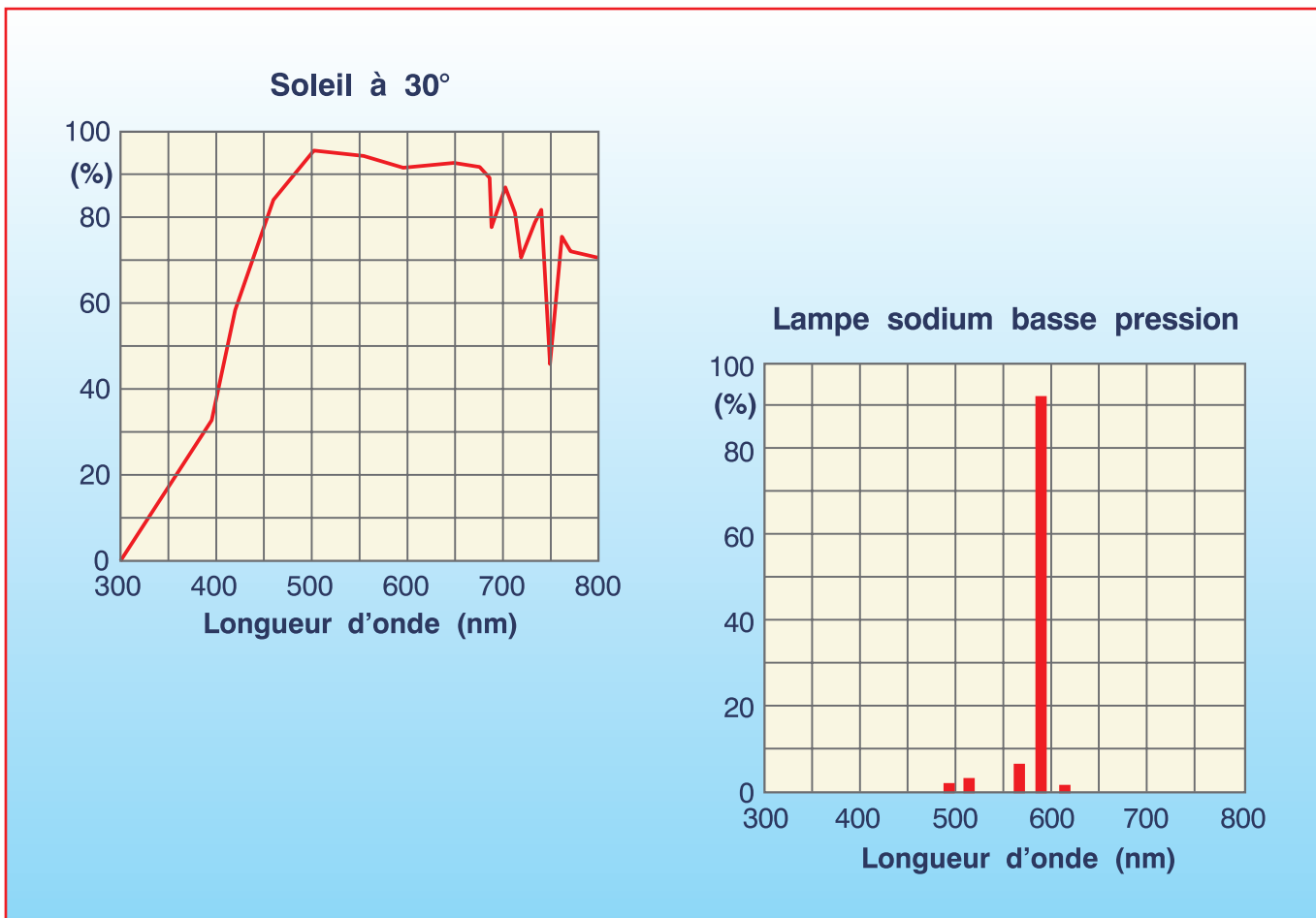
La température de couleur et l'indice de rendu des couleurs d'un flux lumineux dépendent de la répartition spectrale lumineuse de sa source.

Le but de la photométrie est de quantifier les grandeurs relatives au rayonnement en fonction de l'impression visuelle produite. Il est dès lors nécessaire de définir ces grandeurs.

Sources lumineuses	Efficacité lumineuse (lm/W)
Rayonnement solaire direct	52 à 97
Ciel couvert	110 à 140
Ciel clair (sans soleil)	125 à 155
Ciel clair avec soleil	105 à 115

Lumière naturelle	Température de couleur (K)
Soleil levant ou couchant	1000 à 2500
Clair de lune	4000 à 4400
Soleil à midi en été	5800 à 6500
Ciel couvert	7000
Ciel clair du Nord	15000 à 20000

Efficacité lumineuse et température de couleur de différentes sources de lumière naturelle. **1**



2 Répartition spectrale du flux lumineux du soleil à 30° et d'une lampe au sodium basse pression.

L'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction donnée. Elle se mesure en candéla, équivalent à 1 lm/sr.

$$I = \Phi / W \quad (\text{cd})$$

L'angle solide (Ω) d'un cône est le rapport de la surface (S) découpée sur une surface sphérique (ayant son centre au sommet de ce cône) au carré du rayon de la sphère. Il s'exprime en stéradians (sr).

$$\Omega = S / r^2 \quad (\text{sr})$$

Le stéradian est donc l'angle solide qui découpe une surface égale à 1 m² sur une sphère d'un mètre de rayon. L'ensemble des angles solides dans une sphère représente 4 π . L'angle solide maximal vaut donc 4 π stéradians. Une source lumineuse ayant la même intensité lumineuse dans toutes les directions est dite à répartition isotrope. En pratique, les sources de lumière sont anisotropes.

L'intensité lumineuse est définie par rapport à une source ponctuelle. En éclairage naturel, on ne parle donc pas d'intensité lumineuse de la voûte céleste.

L'éclairement

L'éclairement (E) d'une surface est le rapport du flux lumineux reçu à l'aire de cette surface. Son unité est le lux, équivalent à 1 lm/m².

$$E = \Phi / S \quad (\text{lx})$$

L'éclairement dépend de l'intensité de la source lumineuse, de la distance entre la source et la surface éclairée et de son inclinaison par rapport aux rayons lumineux. L'éclairement caractérise donc la quantité de lumière reçue par une surface. Cependant, cette grandeur est très difficilement perceptible par l'œil humain. De par ses facultés d'adaptation, celui-ci évalue en réalité des différences d'éclairement dans l'espace ou dans le temps.

L'échelle des niveaux d'éclairement disponibles naturellement est très étendue : elle varie de 0,2 à 100 000 lx. La figure 1 donne quelques valeurs d'éclairement d'une surface horizontale extérieure.

La luminance

La luminance (L) d'une source est le rapport entre l'intensité lumineuse émise dans une direction et la surface apparente de la source lumineuse dans la direction considérée. La luminance s'exprime en candéla par mètre carré (cd/m²).

$$L = I / S_{\text{apparente}} \quad (\text{cd/m}^2)$$

Elle traduit la sensation visuelle de luminosité créée par une source lumineuse principale (le soleil, le ciel...) ou par une source de lumière secondaire (surface éclairée).

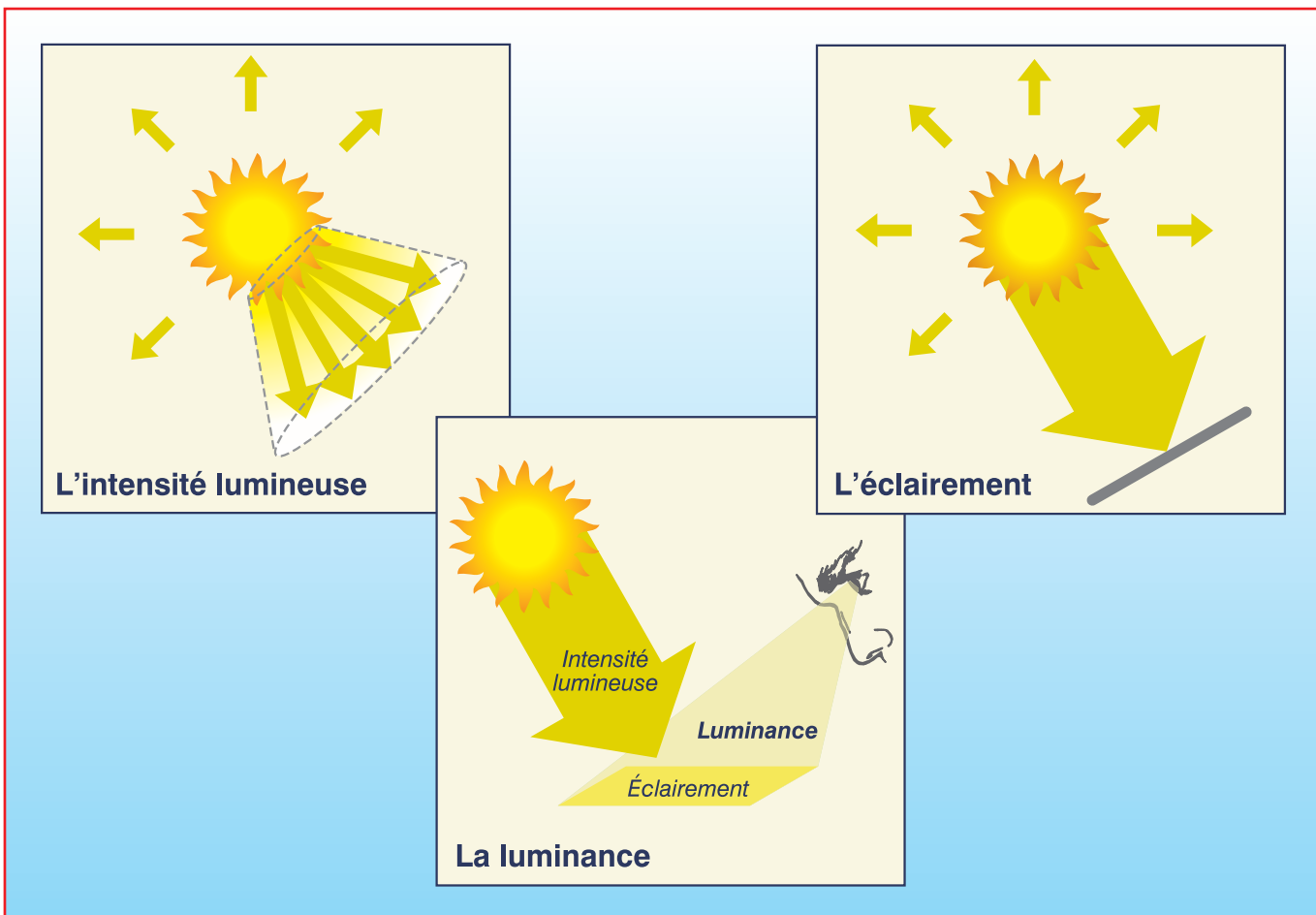
La luminance est la seule grandeur photométrique réellement perçue par l'œil humain. La luminance d'une surface dépend de l'éclairement de cette surface, de son coefficient de réflexion et de sa brillance. Dans le cas d'une surface parfaitement diffusante, éclairée de façon uniforme, la luminance est proportionnelle au facteur de réflexion de cette surface (ρ) et à l'éclairement qu'elle reçoit. L'œil humain perçoit des luminances allant d'environ 10⁻³cd/m², en vision nocturne où la perception des couleurs est impossible, à 10⁵ cd/m². Par contre, il n'est pas sensible à des variations de luminance inférieures à 20 % car il ne peut que comparer et non mesurer des sensations lumineuses. La figure 1 donne des ordres de grandeur de luminances de différents environnements.

La sensation de luminosité ressentie par l'œil est représentée par la notion de luminance. Cependant, les recommandations sont souvent données en termes d'éclairement, plus facilement mesurable que la luminance.

Sources lumineuses	Éclairement (lx)
Pleine lune	0,2
Ciel couvert	5 000 à 20 000
Ciel clair (sans soleil)	7 000 à 24 000
Plein soleil d'été	100 000

Environnement	Luminance (cd/m ²)
Paysage nocturne (limite de la visibilité)	10 ⁻³
Paysage par pleine lune	10 ⁻² à 10 ⁻¹
Papier noir mat éclairé par 100 lux	1,5
Parois intérieures éclairées	25 à 250
Papier blanc mat éclairé par 100 lux	30
Paysage par ciel couvert	300 à 5 000
Paysage par ciel clair	500 à 25 000
Lune	2 500
Papier blanc au soleil	25 000
Soleil	1,5.10 ⁹

Éclairement et luminance de différentes sources de lumière naturelle. **1**



2 Définition de l'intensité lumineuse, l'éclairement et la luminance.

Le facteur de lumière du jour (FLJ) est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point d'un plan de référence à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé, par ciel couvert.

Ces deux valeurs d'éclairement sont dues à la lumière reçue d'un même ciel dont la répartition des luminances est supposée ou connue, la lumière solaire directe en étant exclue. Le FLJ s'exprime en %.

$$FLJ = E_{\text{intérieur}} / E_{\text{extérieur}} (\%)$$

Sous les conditions de ciel couvert, les valeurs du facteur de lumière du jour sont indépendantes de l'orientation des baies vitrées, de la saison et de l'heure. Elles donnent ainsi une mesure objective et facilement comparable de la qualité de l'éclairement à l'intérieur d'un bâtiment. Les valeurs du FLJ d'un local peuvent alors être comparées aux valeurs de FLJ minimum de référence. Cependant, le FLJ ne permet pas de voir immédiatement si les niveaux d'éclairement recommandés pour une tâche visuelle sont atteints.

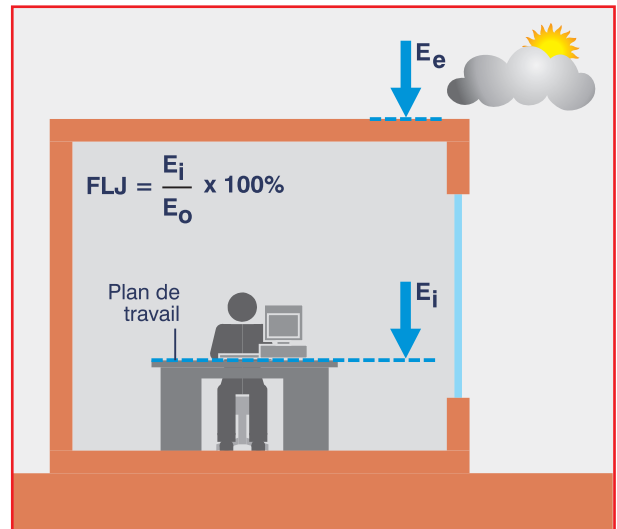
Ceci étant, une fois qu'on connaît le facteur de lumière du jour en un point d'un local, on peut calculer l'éclairement atteint en ce point, à n'importe quel moment de l'année, sous des conditions de ciel couvert, à partir de l'éclairement horizontal extérieur.

Prenons l'exemple d'une salle de classe de 6 m de profondeur et de 3 m de haut, accolée à un couloir et reliée à celui-ci par une ouverture. Les bandeaux vitrés s'étendent sur toute la longueur de la salle, soit 8 m. La figure 2a illustre la variation du FLJ, par ciel couvert, en fonction de la profondeur des locaux. Il apparaît donc que l'éclairement en un point varie selon sa position par rapport aux fenêtres. Il faut souligner que les courbes du FLJ données sont valables pour n'importe quel moment et pour toutes les orientations du bâtiment, car le ciel est couvert, mais qu'elles sont strictement dépendantes de la taille et de la position des fenêtres. Le facteur de lumière du jour permet de comparer aisément deux dispositifs d'éclairage naturel.

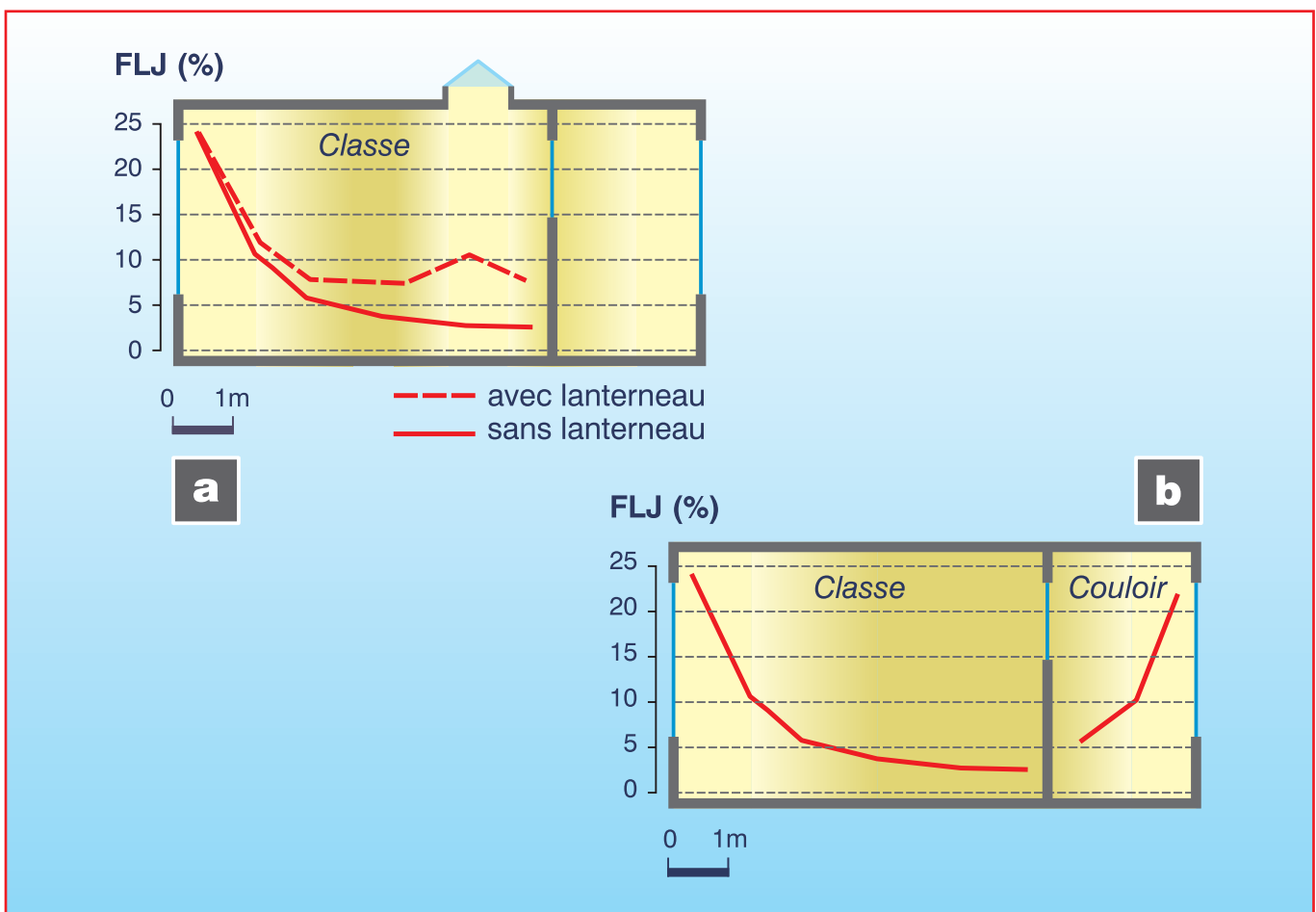
La figure 2b présente l'amélioration du FLJ en fond de local par l'ajout d'un lanterneau. La courbe continue donne la variation du FLJ de la pièce sans lanterneau, tandis que la courbe en pointillés présente l'influence du lanterneau sur l'éclairement en fond de classe.

Il faut toutefois signaler que la conception d'un bon système d'éclairage naturel exige de tenir compte du lieu et de l'orientation du projet mais aussi des variations de la lumière naturelle en fonction de la saison, du jour, de l'heure et des conditions climatiques.

Le facteur de lumière du jour est le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point d'un plan de référence à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé, par ciel couvert.



Définition du facteur de lumière du jour. **1**



2 Exemple d'un local de classe.

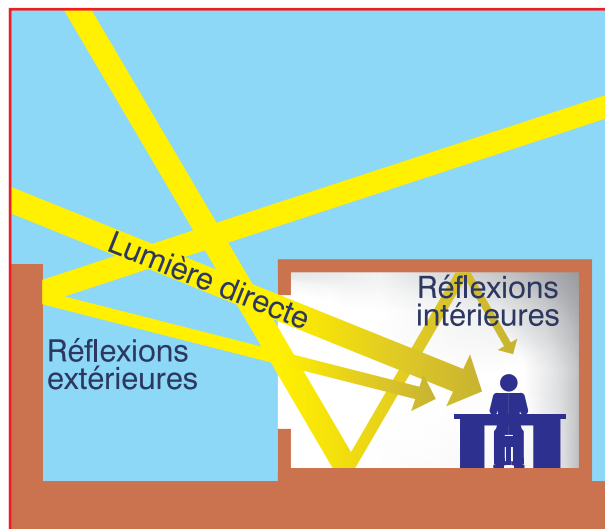
La figure 1 montre les trois composantes de la lumière à l'intérieur d'un local. À chaque réflexion, la quantité de lumière est réduite en fonction du facteur de réflexion des surfaces rencontrées. La stratégie de la lumière naturelle doit tenir compte de ces trois composantes.

La quantité de lumière directe pénétrant dans le local dépend, en plus des paramètres propres au climat et à l'ouverture elle-même, du nombre, de la taille et de la position des obstructions extérieures. Plus celles-ci seront hautes, larges et rapprochées et moins de lumière directe pénétrera dans le local (figure 2a).

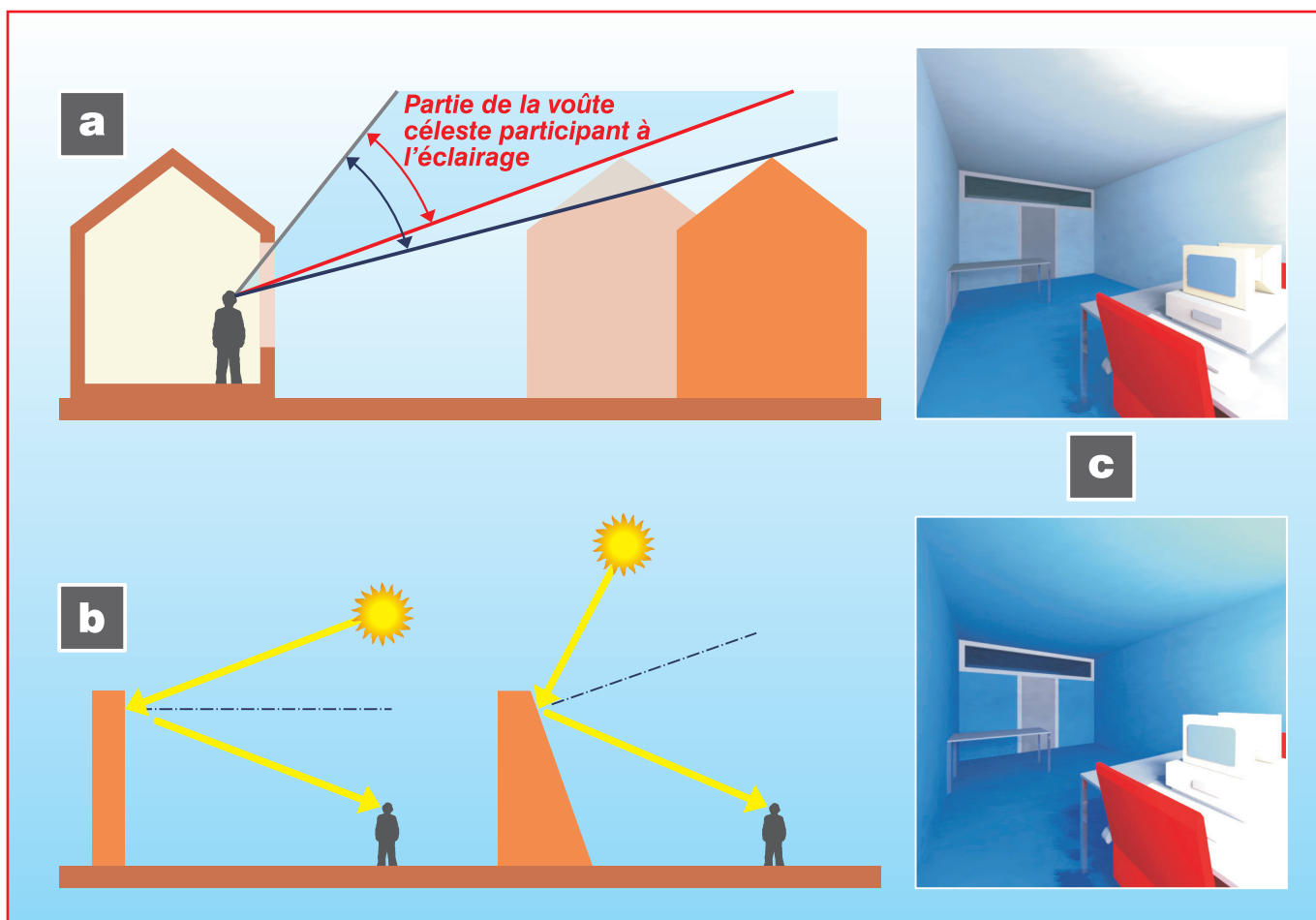
La quantité de lumière réfléchiée par les surfaces extérieures dépend des caractéristiques géométriques ainsi que de la position de ces surfaces, mais également du facteur de réflexion de celles-ci. Par exemple, certains bâtiments fortement vitrés peuvent devenir eux-mêmes des sources d'éclairage qui peuvent induire des problèmes d'éblouissement importants (figure 2b).

La figure 2c montre le même local avec des parois de coefficients de réflexion des surfaces différents. Les coefficients de réflexion des parois du local du haut sont extrêmement importantes et valent 33 % (sol), 83 % (murs) et 95 % (plafond). Le local du bas, quant à lui, a des valeurs de 18 %, 28 % et 33 %. La sensation visuelle ressentie dans ce local est différente selon le degré de clarté de ses parois intérieures. Un local aux parois sombres donnera une impression de fermeture et son volume semblera plus petit qu'un local aux parois claires.

La lumière naturelle perçue à l'intérieur d'un bâtiment est la résultante de trois composantes : la lumière directe due au ciel et au soleil, la partie de la lumière réfléchie sur les surfaces extérieures et celle provenant des inter réflexions dans le local.



Les composantes de la lumière naturelle à l'intérieur d'un local. **1**



- 2** a : Influence des obstructions extérieures.
b : Réflexion du soleil sur des parois d'inclinaisons différentes.
c : Influence du facteur de réflexion des parois intérieures.

L'absorption

Éclairé par la lumière naturelle, un objet en absorbe plus ou moins les composantes : s'il les absorbe toutes, il apparaît noir ; s'il les renvoie toutes, il apparaît blanc. Un objet de couleur rouge est un objet qui réfléchit la couleur rouge et absorbe les autres parties du spectre de la source lumineuse qui l'éclaire.

La réflexion

Il existe quatre modes de réflexion de la lumière sur une surface :

- la réflexion spéculaire : la lumière est renvoyée selon un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence du rayon lumineux ;
- la réflexion diffuse parfaite : la lumière réfléchie est distribuée dans toutes les directions ;
- la réflexion diffuse quelconque : la lumière se répartit de manière aléatoire ;
- la réflexion mixte : la lumière est réfléchie de manière diffuse mais privilégie quand même une direction précise.

Le mode de réflexion de la lumière sur une surface dépend de la brillance de cette surface.

Une surface spéculaire (miroir ou métal poli) est lisse et parfaitement réfléchissante. La réflexion d'un objet sur une surface spéculaire reproduira l'image inversée de celui-ci. Une surface brillante est lisse et partiellement réfléchissante. Un objet réfléchi sur une surface brillante y dessine sa silhouette. Une surface mate est parfaitement diffusante. Aucun objet ne peut être perçu par sa réflexion sur une surface mate. Le comportement d'une surface satinée correspond à celui d'une surface brillante ou mate selon l'angle d'incidence du rayon lumineux. Si le rayon est rasant, la surface satinée réagit comme une surface brillante. Lorsque l'angle d'incidence diminue, elle se rapproche d'une surface mate.

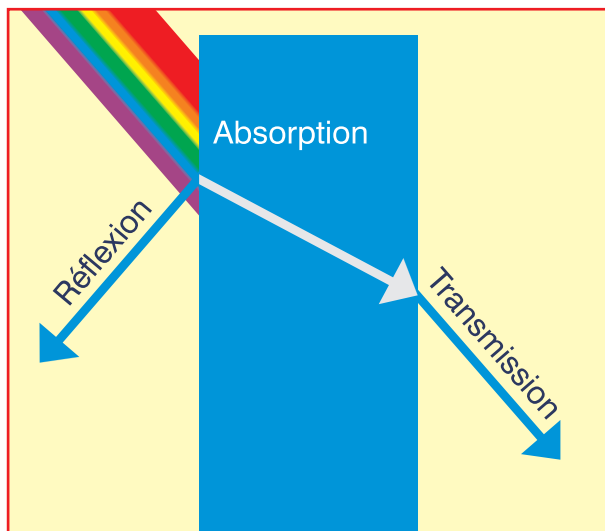
La transmission

Il existe quatre modes de transmission de la lumière :

- la transmission directionnelle : la lumière est transmise selon un angle égal à l'angle d'incidence du rayon lumineux ;
- la transmission diffuse parfaite : la lumière transmise est distribuée dans toutes les directions ;
- la transmission diffuse quelconque : la lumière se répartit de manière aléatoire ;
- la transmission mixte : la lumière est transmise de manière diffuse mais privilégie quand même une direction précise.

Du point de vue de la transmission de la lumière, les corps se regroupent en trois catégories selon qu'ils sont transparents, translucides ou opaques à la lumière. La transmission lumineuse est aussi une propriété variable en fonction de l'épaisseur d'un matériau ; par exemple, une feuille d'or très mince laisse filtrer une lumière verte.

Quelle que soit la couleur de la lumière émise, les objets ne font que l'absorber, la réfléchir ou la transmettre sélectivement. Les effets produits par chacun de ces phénomènes dépendent de la longueur d'onde de la lumière et sont à l'origine de la couleur des objets.



La propagation de la lumière. 1

a La réflexion

Réflexion spéculaire Réflexion diffuse parfaite Réflexion diffuse quelconque Réflexion mixte

b La transmission

Transmission directionnelle Transmission diffuse parfaite Transmission diffuse quelconque Transmission mixte

- 2 a : Les différents modes de réflexion.
b : Les différents modes de transmission.

Facteur de réflexion des matériaux

Une surface dont le facteur de réflexion est élevé réfléchit beaucoup la lumière et apparaît claire. Une surface dont le facteur de réflexion est faible, réfléchit peu la lumière et apparaît sombre.

Les coefficients de réflexion lumineuse des parois d'un local influencent fortement la répartition de la lumière. Celle-ci est d'autant meilleure que les réflexions de la lumière sur chaque paroi sont élevées et uniformément réparties. Il est donc important de tenir compte des facteurs de réflexion des matériaux de finition et de l'ameublement.

En règle générale, pour une bonne distribution de la lumière, les murs et les plafonds devraient de préférence être de couleur claire et mate afin de bien répartir les luminances.

Pour éviter une réflexion gênante et pour des raisons pratiques, le sol sera plutôt sombre, et les surfaces brillantes seront de préférence petites et réservées aux meubles ou aux portes.

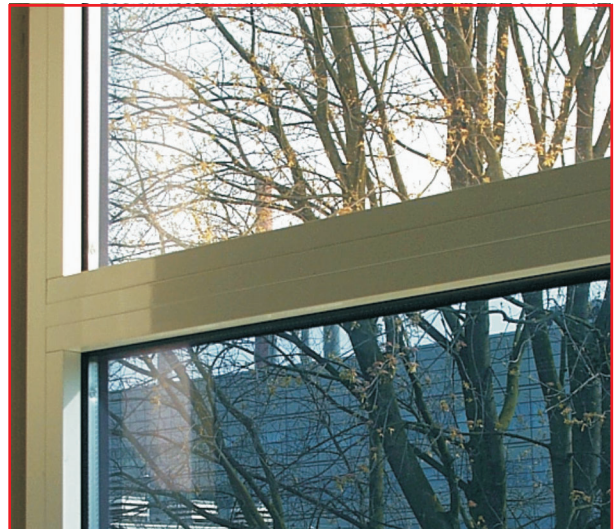
Des couleurs vives seront utilisées pour mettre en évidence des petits objets et animer l'espace. Utiliser localement des couleurs gaies ou contrastées permet d'éviter la monotonie.

Il faut savoir que la plupart des matériaux architecturaux ont de faibles facteurs de réflexion. Un plancher clair peut avoir un facteur de réflexion de 30 %, mais pas beaucoup plus, ce qui est nettement plus bas que les murs (~50 %) et que les plafonds (~70 %). Seules les surfaces extrêmement claires, comme une peinture blanche très propre, ont un facteur de réflexion supérieur à 70 %.

Facteur de transmission des matériaux

La quantité de lumière qui pénètre dans le bâtiment est d'autant plus grande que le facteur de transmission lumineuse du vitrage est élevé.

Le facteur de réflexion (ρ) d'une surface est la quantité d'énergie lumineuse qu'elle réfléchit par rapport à celle qu'elle reçoit.
Le facteur de transmission lumineuse (TI) est le pourcentage de rayonnement solaire visible transmis au travers d'une paroi.



Vitrages présentant des facteurs de transmission différents. **1**

Nature du sol	Facteur de réflexion	Peintures	Facteur de réflexion
Pelouse	0,18 à 0,23	Couleurs claires (forte teneur en blanc)	
Herbe sèche	0,28 à 0,32	blanc	0,8
Sable	0,09 à 0,55	jaune	0,7
Plan d'eau (h. soleil : 40° à 10°)	0,1 à 0,47	beige	0,65
Prairie	0,14 à 0,18	vert	0,6
Arbre à feuilles caduques	0,15	gris	0,6
Conifère	0,05	rose, brun, bleu	0,5
Neige fraîche	0,8 à 0,9	rouge	0,35
Neige ancienne	0,45 à 0,7	Couleurs moyennes (saturation moyenne)	
Terre	0,26	blanc	0,7
Macadam	0,18	jaune	0,5
Gravier	0,15 à 0,35	beige	0,45
Matériaux de construction		gris, rose	0,35
Vitrage	0,08 à 0,4	vert	0,3
Brique rouge	0,05 à 0,2	brun	0,25
Béton neuf	0,4 à 0,5	bleu, rouge	0,2
Béton vieux	0,05 à 0,15	noir	0,04
Ciment	0,2 à 0,4	Couleurs foncées (forte teneur en noir)	
Ardoises	0,1 à 0,15	jaune	0,3
Aluminium	0,55 à 0,75	beige	0,25
Tôles de zinc (après usage)	0,08 à 0,2	gris, rose	0,2
Asphalte	0,08 à 0,12	vert	0,12
Nickel	0,48 à 0,63	rouge	0,1
Cuivre	0,48 à 0,5	brun	0,08
Chrome	0,52 à 0,7	bleu	0,05

2 Facteurs de réflexion de différents matériaux.

L'environnement visuel nous procure une sensation de confort quand nous pouvons voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable.

L'obtention d'un environnement visuel confortable dans un local favorise le bien-être des occupants. Par contre, un éclairage trop faible ou trop fort, mal réparti dans l'espace ou dont le spectre lumineux est mal adapté à la sensibilité de l'œil ou à la vision des couleurs, provoque à plus ou moins longue échéance une fatigue, voire même des troubles visuels, accompagnés d'une sensation d'inconfort et d'une performance visuelle réduite.

Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairement, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur.

Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant sont :

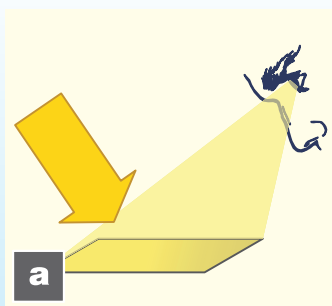
- le niveau d'éclairement de la tâche visuelle ;
- une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- les rapports de luminance présents dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets ;
- une vue vers l'extérieur ;
- un rendu des couleurs correct ;
- une teinte de lumière agréable ;
- l'absence d'éblouissement.

Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales que ces paramètres devraient atteindre : il n'existe en effet pas de solution universelle au problème du confort visuel car celui-ci sera influencé par le type de tâche, la configuration du lieu, et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière sera influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.

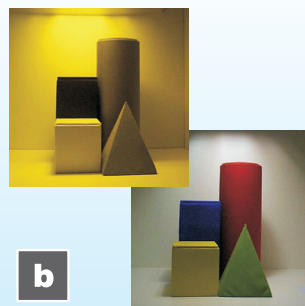
**Le confort visuel est
 une impression
 subjective liée
 à la quantité,
 à la distribution
 et à la qualité
 de la lumière.**



Un espace confortable au niveau visuel. **1**



a Le niveau d'éclairage de la tâche visuelle



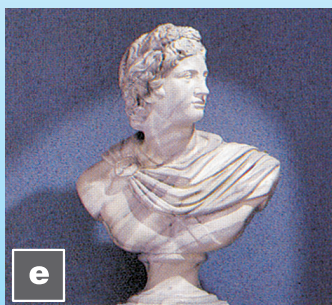
b Un rendu des couleurs correct



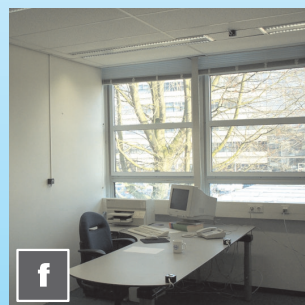
c Les rapports de luminance dans le local et une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace



d L'absence d'ombres gênantes



e La mise en valeur du relief et du modelé des objets



f Une vue vers l'extérieur et une teinte de lumière agréable



g Une vue vers l'extérieur et une teinte de lumière agréable



h L'absence d'éblouissement

2 Les paramètres du confort visuel.

L'éclairagement moyen recommandé est généralement fixé selon la fonctionnalité du local et la précision de la tâche visuelle qui doit y être exercée. Le niveau d'éclairagement choisi pour un bureau paysager peut s'avérer catastrophique s'il est mis en œuvre dans une pièce de fonctionnalité très différente, par exemple le foyer d'un théâtre ou le salon d'une habitation.

Les recommandations sont souvent données en termes d'éclairagement, plutôt que de luminance, pour la facilité de sa mesure. Comme la sensation de luminosité est mieux représentée par la luminance, il faut tenir compte du coefficient de réflexion dans le choix de l'éclairagement d'une surface. Plus il est faible, ou sa couleur foncée, plus la vision s'avère difficile et plus le niveau d'éclairagement doit être élevé.

De plus, les niveaux d'éclairagement conseillés doivent être nuancés en fonction du contraste de luminance entre l'élément observé et son arrière-fond.

Les pratiques de l'éclairagisme ont montré qu'il était important, en ce qui concerne la maintenance des performances visuelles, de considérer la variation de l'éclairage dans le temps. La figure 1 représente la variation de l'éclairage moyen dans un local en fonction de la durée d'utilisation d'une installation. Cette figure précise les notions d'éclairagement moyen "en service", "à maintenir" et "initial". La valeur effectivement maintenue doit être toujours supérieure à la valeur à maintenir.

L'éclairagement moyen en service est l'éclairagement que l'on doit constater au milieu de la période couvrant deux interventions d'entretien consécutives.

L'éclairagement moyen à maintenir est l'éclairagement juste encore acceptable avant une intervention d'entretien : nettoyage des luminaires complété ou non par le remplacement simultané des lampes.

L'éclairagement moyen initial est l'éclairagement moyen lorsque l'installation d'éclairage est neuve. L'éclairagement moyen initial est la valeur prise en considération dans les calculs relatifs au projet d'éclairage. En absence d'indication, l'éclairagement moyen initial sera, respectivement, de : 1,5 / 1,75 / 2 fois l'éclairagement à maintenir pour les locaux à empoussièrément respectivement faible / moyen / élevé.

La figure 2 donne des valeurs d'éclairagement moyen à maintenir, pour différents types de bâtiments, recommandées par l'Association Française de l'Éclairage (AFE).

Une étude de la distribution lumineuse doit tenir compte des quatre critères suivants :

- la qualité de la répartition de la lumière dans l'espace, impliquant l'étude de l'équilibre harmonieux des luminances et des couleurs ;
- les rapports de luminance présents dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets.

La distribution de la lumière naturelle peut être uniforme, localisée ou mixte : dans ce dernier cas, un niveau d'éclairage général existe pour tout l'espace et un éclairage localisé complémentaire est prévu en fonction des besoins spécifiques de la tâche visuelle.

La répartition de la lumière

Pour permettre à la lumière naturelle de se distribuer le mieux possible dans le local, il est essentiel de placer le mobilier de telle sorte qu'il ne fasse pas écran et de disposer les zones d'activité judicieusement. Les plans de travail seront situés préférentiellement près des ouvertures où la lumière naturelle est bien reçue.

Les rapports de luminance

La distribution lumineuse d'un espace doit être telle que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Des zones extrêmement sombres ou brillantes donnent naissance à l'inconfort visuel et doivent être évitées.

Lorsqu'il y a de grandes différences de luminance dans le champ visuel, l'œil doit s'adapter lorsque la direction du regard change. Pendant son adaptation, l'acuité visuelle est diminuée. Pour éviter de telles fatigues inutiles, il convient de ne pas dépasser certaines valeurs de contraste entre les différentes zones du champ visuel. Cependant, si les différences entre les niveaux de luminance sont trop faibles, on crée dans le local une impression de monotonie très désagréable.

La perception des détails d'une tâche visuelle est facilitée par les contrastes de luminance et de couleur entre ces détails et l'arrière-fond. De plus, un contraste suffisant devrait être appliqué pour favoriser la perception du relief des objets. Il s'agit donc de trouver un compromis entre ces exigences.

La figure 2a permet de lier les variations de luminance à la sensation de l'œil. Par exemple, un rapport de 10/1 entre deux points du champ visuel apparaît comme subtil. Ce rapport est recommandé comme rapport maximal entre une tâche visuelle et l'arrière fond général du local. La figure 2b donne le niveau d'adaptation de l'œil qui est déterminé par le rapport des brillances des surfaces situées dans les directions de vue principales.

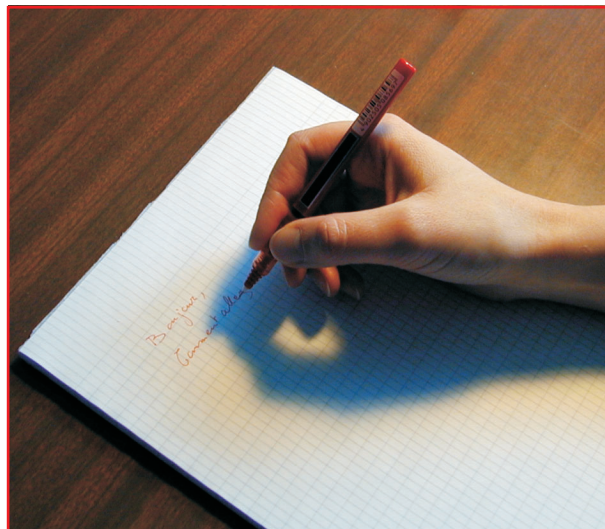
Les ombres gênantes

Les ombres qui sont créées par la présence d'un élément entre la tâche visuelle et la source lumineuse sont mauvaises pour la vision puisqu'elles diminuent fortement les contrastes.

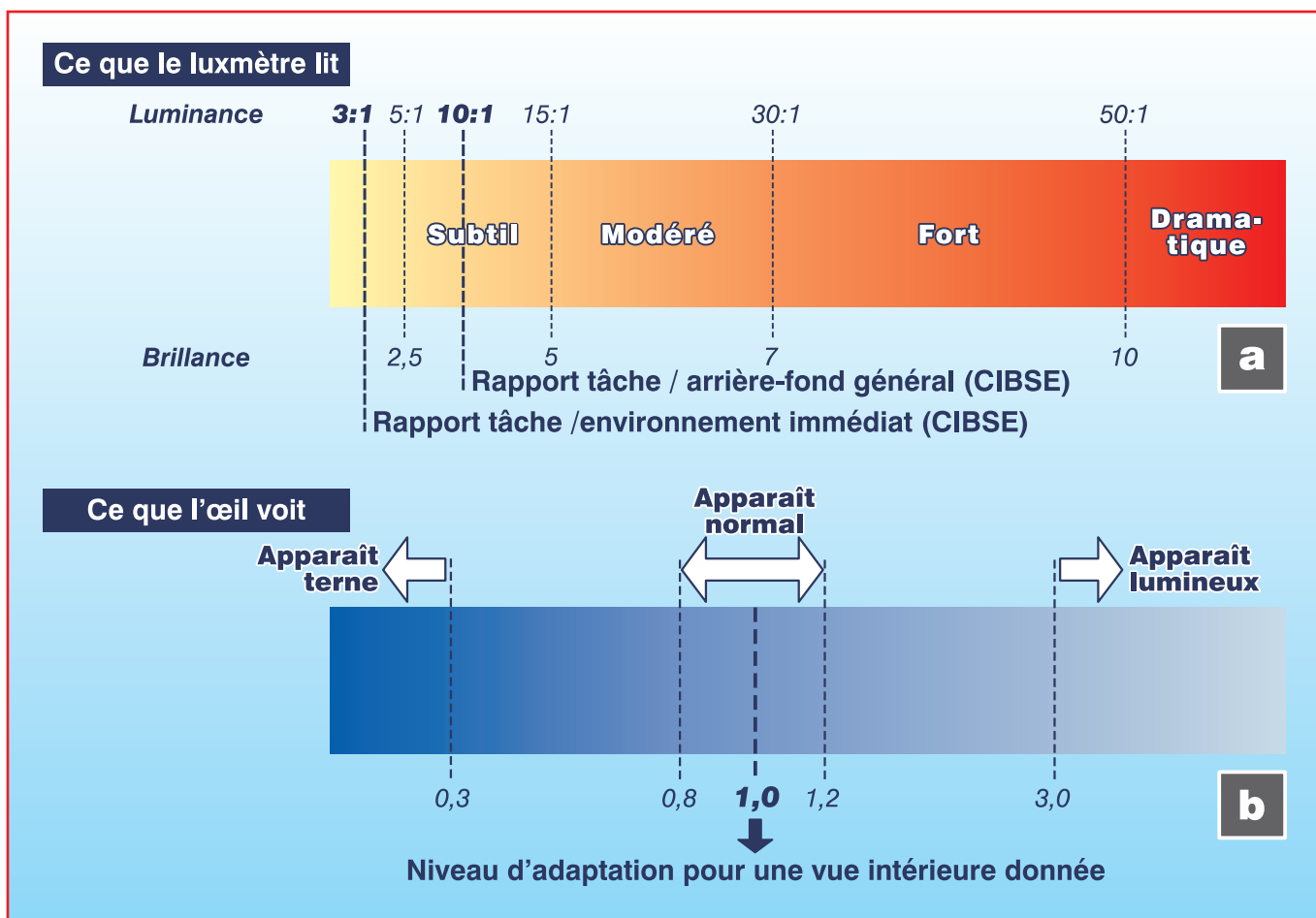
Le travail de lecture ou d'écriture ne peut être perturbé par des ombres parasites. Il faut donc éviter les situations suivantes :

- un éclairage latéral venant de droite pour les droitiers (figure 1) ;
- un éclairage latéral venant de gauche pour les gauchers ;
- un éclairage provenant du dos des occupants.

L'étude de la distribution de la lumière naturelle du point de vue du confort visuel consiste à trouver un éclairage ni excessif ni trop faible, qui permette une bonne perception des objets et des couleurs dans une ambiance agréable.



Ombre gênante. 1



2 a : Sensation de l'œil en fonction de la variation de la luminance.

b : Niveau d'adaptation de l'œil.

L'éclairage naturel est préféré à l'éclairage artificiel pour sa variabilité et ses nuances. La variabilité de la lumière naturelle permet d'établir une harmonie avec le monde extérieur et crée une ambiance intérieure plus chaleureuse. Son caractère cyclique est un facteur important pour notre équilibre psychique. La lumière naturelle est un élément indispensable pour une bonne perception de l'instant et du lieu où nous évoluons.

De plus, la qualité spectrale de la lumière naturelle assure la meilleure vision possible des objets et des couleurs. Si on compare la répartition spectrale de la lumière naturelle à la courbe de sensibilité de l'œil, il apparaît que l'œil humain est naturellement adapté à la lumière naturelle (figure 1). La lumière diurne constitue donc l'éclairage d'ambiance par excellence.

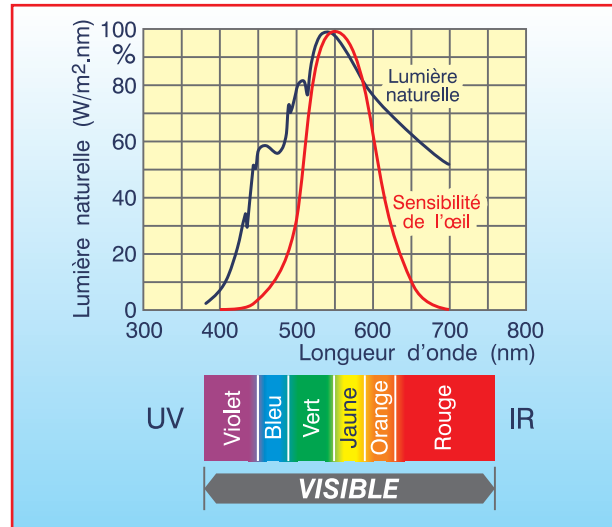
L'éclairage naturel est le plus approprié tant au niveau physiologique que psychologique mais sa variabilité nécessite un apport complémentaire d'éclairage artificiel ou, à d'autres moments, l'utilisation d'occultations temporaires. L'éclairage artificiel doit donc être considéré comme le complément de la lumière naturelle et s'accorder autant que possible à son spectre lumineux et à ses variations grâce à un système de contrôle adéquat. Pour le confort des occupants, la source lumineuse principale doit être le soleil.

Les baies vitrées, par lesquelles la lumière naturelle pénètre, offrent le double avantage d'une communication visuelle vers l'extérieur et d'une vue au loin nécessaire au repos de l'œil après une vision rapprochée.

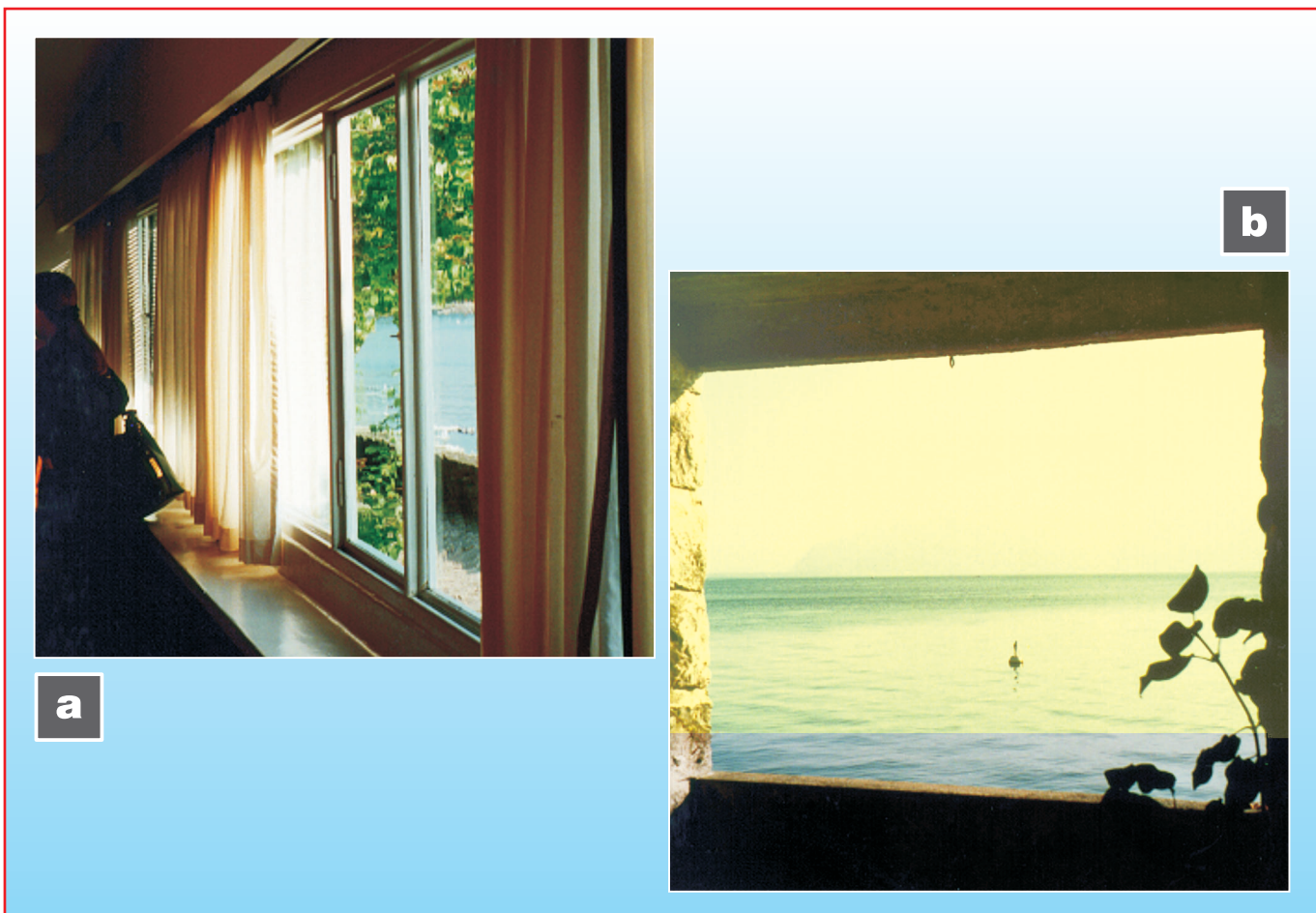
La vue à travers une fenêtre, même si elle n'est pas spécialement attrayante, permet de se situer par rapport au monde extérieur. La possibilité de regarder à travers une fenêtre est reposante et d'autant plus fondamentale que la tâche visuelle nécessite une vision détaillée et proche (figure 2).

Enfin, les baies vitrées jouent un rôle esthétique indéniable puisqu'elles font participer les paysages extérieurs à l'ambiance visuelle d'un espace déterminé.

La lumière naturelle est l'un des éléments dont l'homme a toujours perçus fortement le besoin et l'impact sur ses activités. Elle influence le bien-être psychosomatique des occupants d'un local.



Courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain. **1**



2 La fenêtre, lien vers le monde extérieur (arch. Le Corbusier).

Une source lumineuse aura un bon rendu des couleurs dans la mesure où elle émet des radiations proches des sensibilités maximales des yeux aux couleurs, situées vers 450 nm pour le bleu, 540 nm pour le vert et 610 nm pour le rouge. Vu que la couleur de la lumière influence directement notre perception de la couleur des objets, elle agit fortement sur la sensation de confort visuel qui lui est associée.

Les radiations colorées émises par les objets de l'environnement peuvent produire certains effets psycho-physiologiques sur le système nerveux. Les couleurs de grande longueur d'onde ont un effet stimulant tandis que celles de courte longueur d'onde ont un effet calmant. Les couleurs intermédiaires (jaune, vert) procurent, de même que le blanc, un effet tonique et favorable à la concentration. Les couleurs foncées et le gris ont par contre une action déprimante. En outre, les couleurs peuvent contribuer dans une large mesure à modifier la dimension apparente des surfaces et des volumes. Les couleurs chaudes seront de préférence utilisées dans des locaux de dimensions exagérées tandis que les couleurs froides seront choisies pour les locaux de dimensions réduites.

Il est déconseillé d'utiliser simultanément des teintes froides et des couleurs chaudes, ce qui gêne l'adaptation de l'œil et crée des perturbations visuelles. Pour les locaux éclairés en grande partie par la lumière naturelle, il est donc préférable de choisir des luminaires de température de couleur élevée afin d'éviter de trop grandes différences entre les éclairages artificiel et naturel.

La couleur de la lumière la mieux adaptée à un espace dépend de différents facteurs tels que le climat, le type de local, la couleur des murs et le niveau d'éclairage. Les teintes chaudes sont préférées dans les climats froids et les teintes froides dans les climats chauds.

Une lumière de couleur chaude est généralement confortable dans une habitation. Dans les bureaux, il est recommandé de choisir des lampes ayant une température de couleur comprise entre 3 000 et 6 000 K. Pour les locaux aveugles, il est indispensable d'utiliser des teintes de couleur froide (température de couleur >5 000 K), appelées "lumière du jour" parce qu'elles sont favorables au bien-être des occupants.

Une harmonisation entre la couleur des sources lumineuses et l'aménagement du local s'impose. Les objets de couleurs chaudes (rouge, orange) sont plus agréables lorsqu'ils sont éclairés par une lumière chaude plutôt que par une lumière froide mais, par contre, la lumière chaude tend à noircir les couleurs froides (bleu, violet).

La couleur de la lumière doit être adaptée au niveau d'éclairage. Quand le niveau d'éclairage augmente, la température de couleur de la lumière doit également s'élever. Le diagramme de Kruithof (figure 1) donne à cet effet les valeurs recommandées de la température de couleur en fonction de l'éclairage. Seule la zone B correspond à la zone de confort. Si quelqu'un se trouve dans la zone A, l'impression visuelle correspond à une ambiance lumineuse irréaliste, trop chaude ; la température de couleur est trop faible pour le niveau d'éclairage considéré. Dans la zone C, l'ambiance lumineuse, de type crépusculaire, est trop froide ; la température de couleur de la source est trop importante par rapport au niveau d'éclairage atteint.

L'utilisation de sources lumineuses dont la température de couleur est très élevée a une influence favorable sur l'ambiance lumineuse d'un local et sur les conditions de vision, élargissant ainsi la zone d'impression agréable limitée par les courbes de Kruithof.

La perception des couleurs varie d'une personne à l'autre. Elle est totalement dépendante de la sensibilité de l'œil, qui est fonction de la longueur d'onde du rayonnement visible perçu.

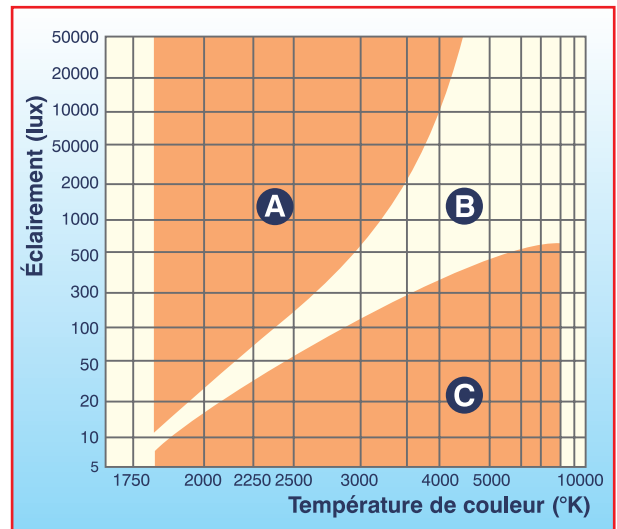
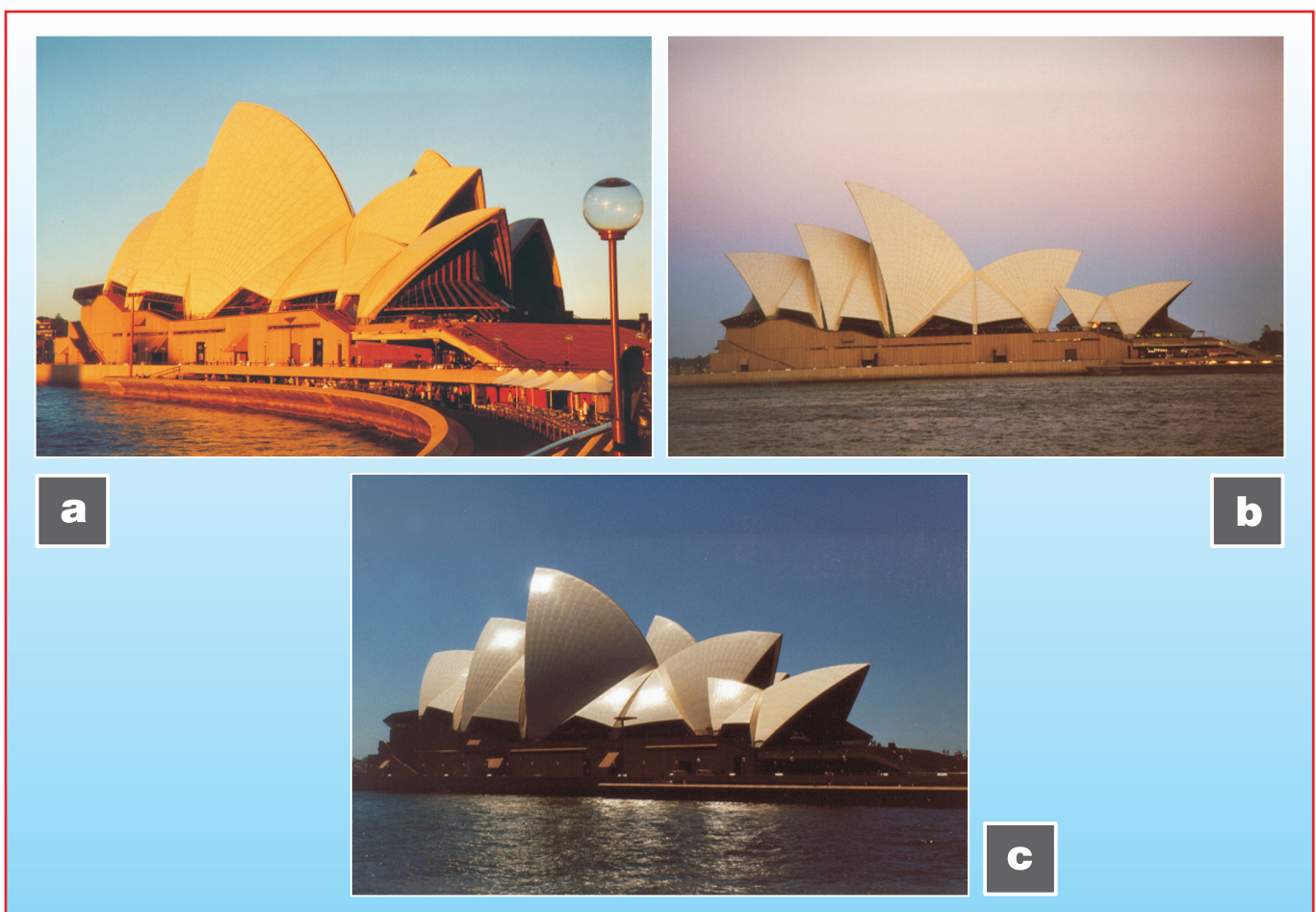


Diagramme de Kruithof. 1



2 L'évolution du spectre lumineux de la lumière naturelle modifie l'aspect d'un même bâtiment (arch. J. Utzon).

L'éblouissement est dû à une luminosité trop intense de surfaces placées dans la direction de la vision ou à un contraste lumineux trop important entre surfaces contiguës. Il place l'individu dans des situations de grand inconfort visuel.

En éclairage naturel, les sources principales d'éblouissement sont :

- la vision directe du soleil ou du ciel au travers des fenêtres ;
- la réflexion du soleil ou du ciel sur les bâtiments voisins ;
- un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et le mur dans lequel elle s'inscrit ;
- un contraste de luminance excessif entre une fenêtre et son châssis ;
- une surface de luminance trop élevée par rapport aux surfaces voisines.

Dans le cas particulier des écrans d'ordinateur, il convient de tenir compte des points suivants :

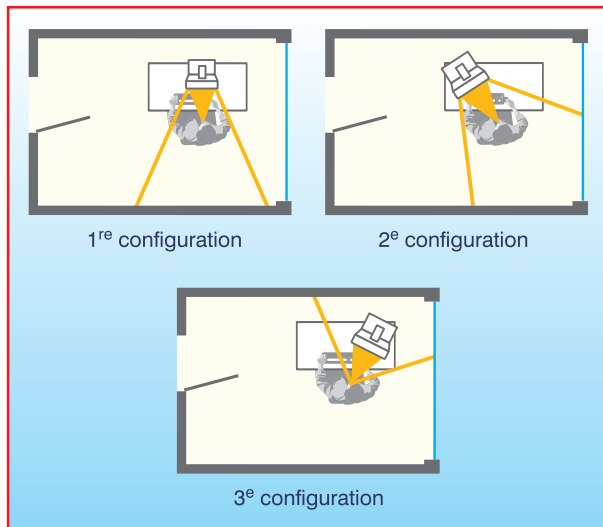
- aucune fenêtre ne doit se trouver devant ou derrière l'écran ;
- l'axe principal du regard doit être parallèle aux fenêtres ;
- les fenêtres doivent être équipées de protections solaires efficaces sur le plan visuel sur toutes les façades. Il est recommandé d'en confier la gestion aux occupants eux-mêmes ;
- les surfaces voisines de l'écran devraient être mates et avoir un facteur de réflexion de 0,2 à 0,5 ;
- la luminance de chaque partie de l'environnement que l'observateur peut voir par réflexion dans son écran doit être aussi uniforme et faible que possible ;
- pour réduire la différence de luminance entre l'écran et le ciel, il peut être utile de placer une rangée de luminaires le long de la fenêtre ;
- les réflexions sont plus perturbatrices sur écran à fond sombre que sur écran à fond clair. Si toutes les autres mesures ont échoué, il faut installer des écrans anti-reflets, bien qu'ils ne soient pas généralement recommandés parce qu'ils réduisent la visibilité des images.

La figure 1 présente les différentes positions d'un écran par rapport à une ouverture à la lumière naturelle. La première configuration est optimale car elle permet de réduire le contraste de luminance dans le champ visuel de l'utilisateur (écran, fond).

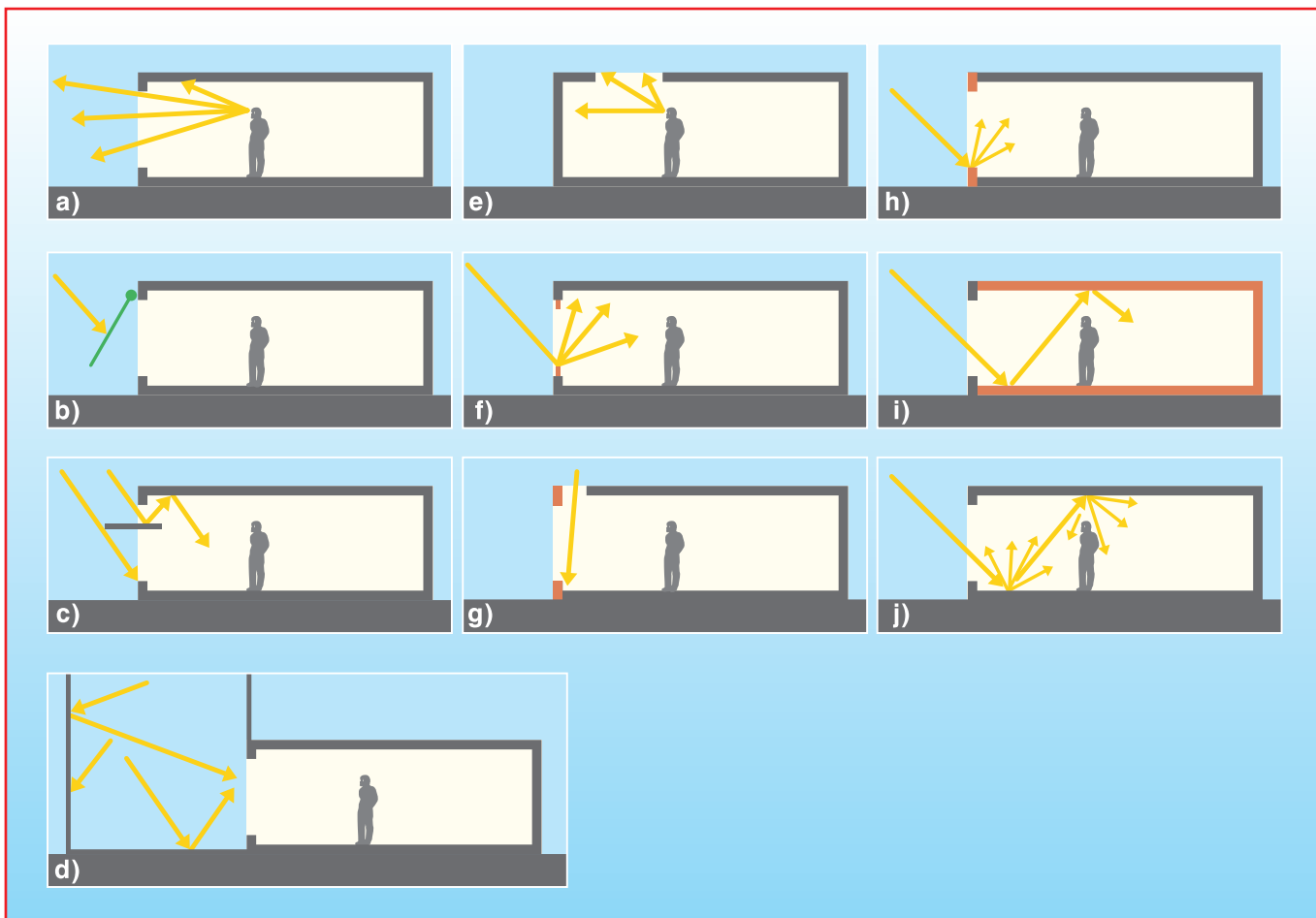
Différentes précautions peuvent être prises pour diminuer les risques d'éblouissement dus à l'éclairage naturel (figure 2) :

- a) prévoir une grande fenêtre plutôt que plusieurs petites fenêtres. En effet, une grande ouverture à la lumière naturelle occasionne moins d'éblouissement qu'une petite car elle augmente le niveau d'adaptation des yeux et diminue le contraste de luminance et la sensation d'éblouissement qui lui est associée ;
- b) voiler le ciel par l'utilisation d'une protection solaire ;
- c) voiler en partie le ciel en assombrissant la fenêtre par un élément déflecteur (lightshelf, murs de refends, débords de toiture...) ;
- d) voiler en partie le ciel en disposant à l'extérieur des éléments moins lumineux que le ciel (atrium, cour intérieure) ;
- e) situer les percements en hauteur (ouvertures zénithales, clerestories...), afin de limiter l'éblouissement direct puisque la plupart des tâches visuelles nécessitent une vue horizontale ou vers le bas ;
- f) diminuer le contraste fenêtre-châssis en augmentant le coefficient de réflexion du châssis au moyen de couleurs claires et mates ;
- g) diminuer le contraste mur-fenêtre en éclairant le mur qui contient la fenêtre ;
- h) diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant le coefficient de réflexion du mur qui contient la fenêtre ;
- i) diminuer le contraste mur-fenêtre en augmentant la part indirecte de l'éclairage naturel au moyen de parois très claires ;
- j) favoriser les revêtements mats car ils diffusent la lumière.

L'éblouissement est l'effet de conditions de vision dans lesquelles l'individu subit une réduction de l'aptitude à percevoir les objets, pouvant aller jusqu'à un aveuglement temporaire.



Positions d'un écran d'ordinateur par rapport à la fenêtre. **1**



2 Diminution de l'éblouissement dû à l'éclairage naturel.

Le rayonnement solaire ne correspond qu'à une partie du spectre des ondes électromagnétiques. Le soleil dégage autour de lui une énergie de 66 millions de W/m^2 , produite par des réactions nucléaires en chaîne. Seule une fraction de cette énergie atteint les limites de notre atmosphère. Elle vaut $1\,353\, W/m^2$ et est appelée "constante solaire". L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que cette valeur car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15 %) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6 %). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus (figure 1).

Il existe différentes courbes donnant des informations sur l'éclairement disponible en un lieu particulier.

La figure 2b donne, par exemple, pour la ville de Nice, une moyenne annuelle de la probabilité journalière P (%) d'avoir un type de ciel, en fonction de l'insolation directe relative S/S_0 (%). L'insolation directe relative est le rapport de l'insolation effective (S) à l'insolation maximale théorique possible (S_0).

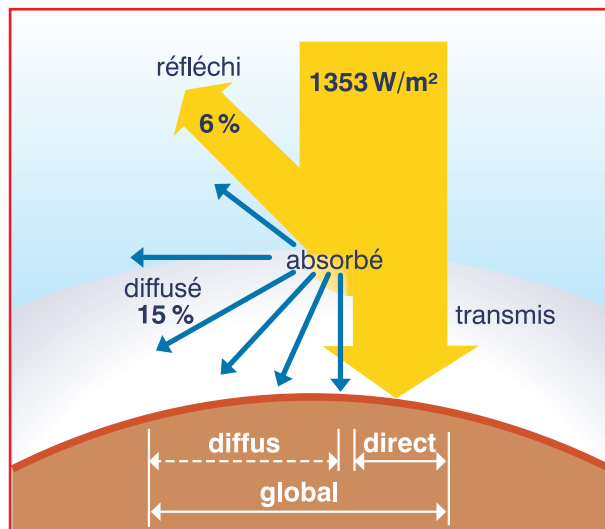
Les différents types de ciel sont :

1. Ciel couvert
2. Ciel couvert intermédiaire
3. Ciel intermédiaire moyen
4. Ciel intermédiaire bleu
5. Ciel bleu

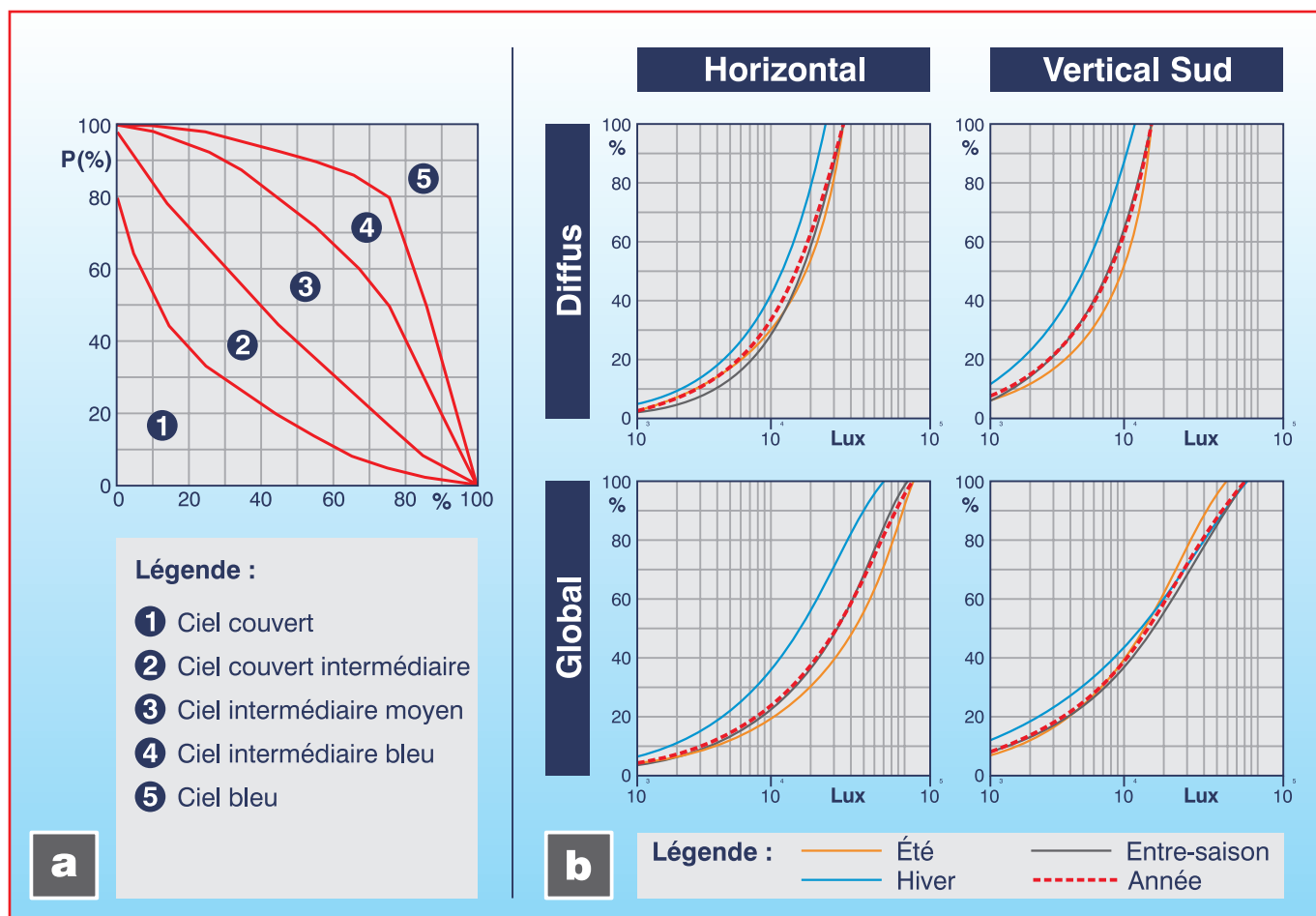
La figure 2a donne, pour la même localisation, la probabilité que l'éclairement d'une surface donnée soit inférieur à une certaine valeur (abscisse). Les résultats sont séparés en éclairement diffus et éclairement global, et existent pour 5 plans différents (surface horizontale et verticale nord, sud, est et ouest), pour trois périodes et pour la totalité de l'année.

Par exemple, à Nice sur la totalité de l'année, la probabilité d'avoir un éclairement global de plus de 10 000 lux sur une surface horizontale est de 34 %.

La disponibilité de la lumière du jour dépend de la position du soleil dans le ciel – définie par l'heure et la position géographique du lieu considéré – ainsi que des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface...



Rayonnement solaire global, direct et diffus. **1**



2 Données d'éclairage et de type de ciel pour Nice.

Les quatre schémas repris sur la figure 2 décrivent les quatre types de ciels standards. La distribution de la luminance est représentée pour chaque ciel par une surface claire d'épaisseur variable : cette bande est d'autant plus épaisse que la luminance est élevée.

Le modèle le plus simple est le ciel uniforme. Sa luminance est indépendante des paramètres géométriques : elle est constante en tout point du ciel à un moment donné. Cette situation correspond à un ciel couvert d'une couche épaisse de nuages laiteux ou à une atmosphère, pleine de poussières, dans lequel le soleil n'est pas visible.

Le second type de ciel standardisé est celui du ciel couvert établi par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), pour lequel la luminance en un point varie en fonction de sa position sur la voûte céleste, suivant la loi :

$$L = L_z \frac{1 + 2 \sin \theta}{3}$$

où L_z représente la luminance au zénith et θ la hauteur de la zone du ciel considérée. La luminance au zénith est donc trois fois plus élevée que la luminance de l'horizon. Ce modèle correspond à un ciel de nuages clairs cachant le soleil. Dans ce cas, la symétrie autour de la direction zénithale indique que l'orientation d'une baie verticale est sans effet sur le niveau d'éclairage intérieur.

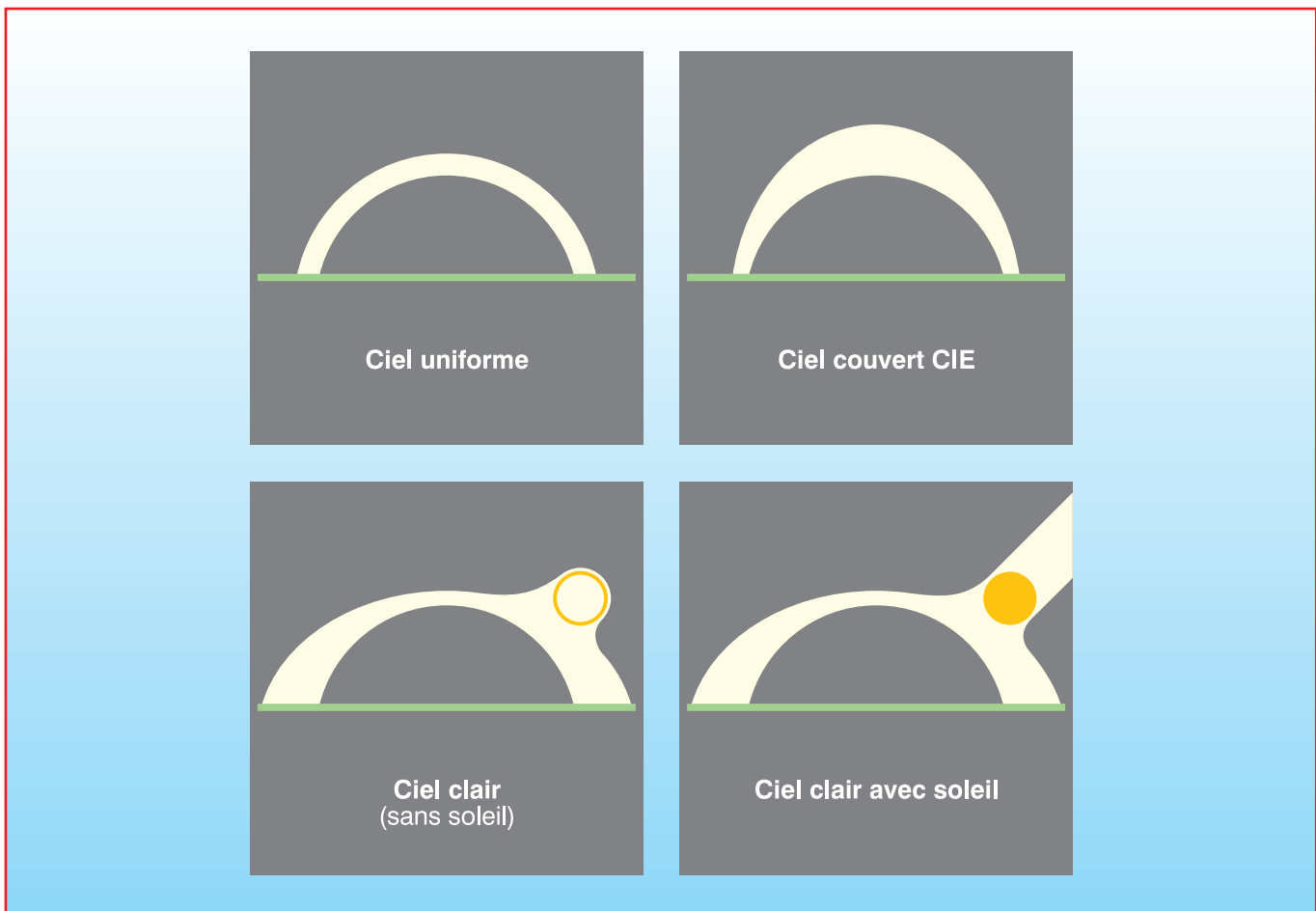
Un troisième type de ciel est le ciel clair, pour lequel les valeurs de luminance varient en fonction de paramètres géométriques et de la position du soleil. Le ciel clair émet un rayonnement diffus qui dépend de la variation de la position du soleil, mais n'intègre pas le rayonnement solaire direct. Ce modèle simule la composante diffuse de l'éclairage d'un ciel serein.

Un quatrième type de ciel est le ciel clair avec soleil. Alors que les trois modèles précédents ne font intervenir que la composante diffuse du rayonnement solaire, le ciel clair avec soleil prend en compte son rayonnement global, c'est-à-dire la somme des rayonnements directs et diffus. Ce quatrième type de ciel correspond à un ciel serein au sein duquel le soleil brille. Le ciel clair avec soleil offre la possibilité d'étudier les jeux d'ombres et de lumière ainsi que les risques d'éblouissement dus à la pénétration du soleil dans un bâtiment.

Vu la multitude des conditions météorologiques existantes, quatre types de ciels standards ont été établis pour les études d'éclairage. Chacun d'eux est caractérisé par la répartition de sa luminance sur la voûte céleste.



Un ciel intermédiaire. 1



2 Les différents types de ciel.

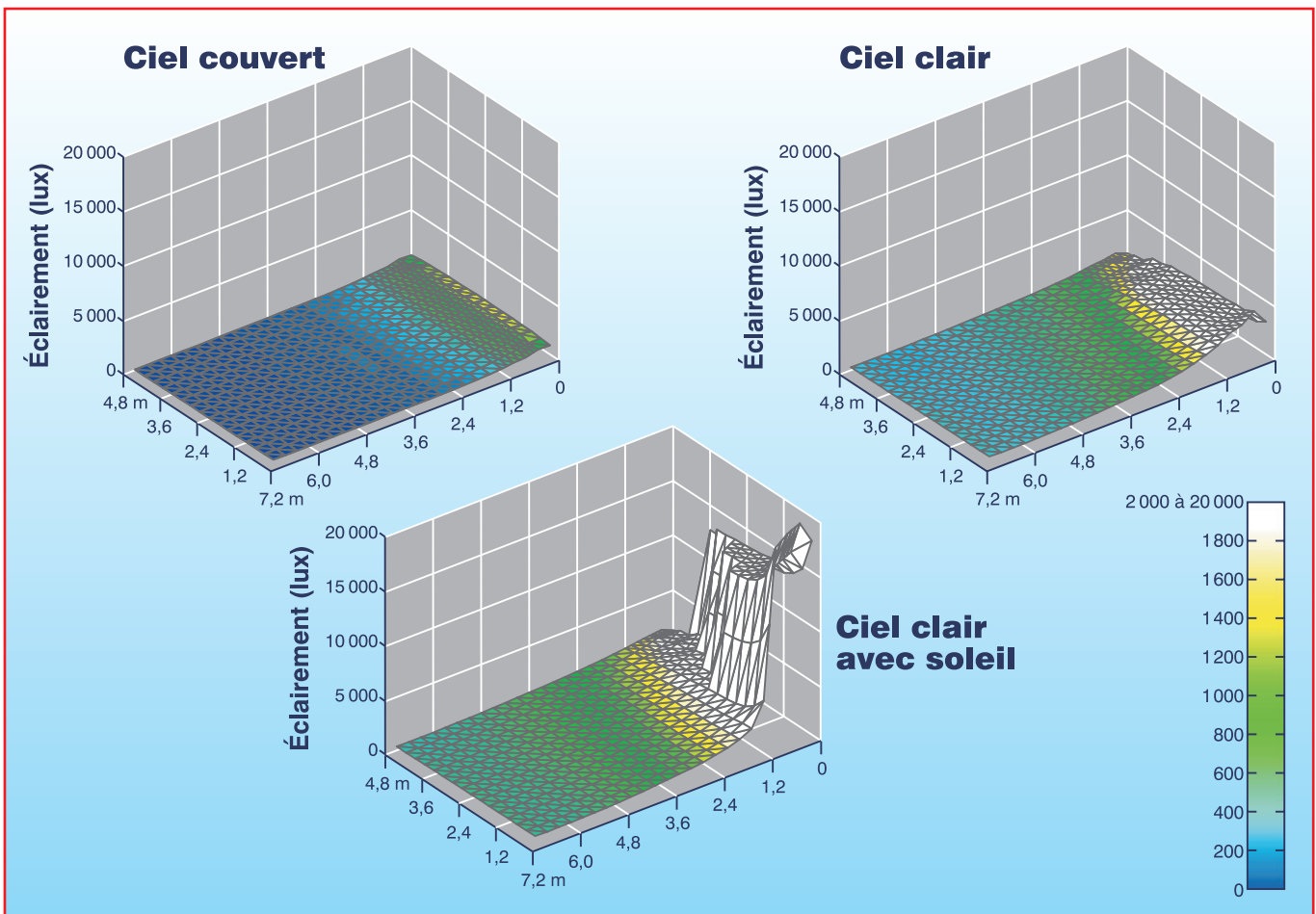
Les résultats des simulations présentés à la figure 2 mettent en évidence l'influence du type de ciel sur la quantité de lumière qui peut être captée par un local, le 15 mars à 9 heures universelles, pour une ouverture orientée au sud. Le ciel couvert fournit un éclairage parfaitement symétrique par rapport à l'axe du local, car la distribution des luminances de la voûte céleste d'un ciel couvert est symétrique par rapport au zénith. Ce n'est pas le cas d'un ciel clair. Ainsi, la répartition lumineuse d'un local éclairé naturellement par un ciel serein est très souvent fortement asymétrique. Les simulations réalisées pour un local orienté vers le sud sous un ciel clair et sous un ciel clair avec soleil, le 15 mars à 9 heures, présentent des niveaux d'éclairage nettement plus importants du côté ouest du local.

Par ciel couvert, les niveaux d'éclairage dans le module simulé varient d'environ 1 300 lx, à 50 cm de la fenêtre, à 70 lx au fond du local. Par ciel clair, ces valeurs d'éclairage augmentent jusqu'à 4 300 lx près de la fenêtre et 300 à 400 lx au fond du local. La présence du soleil dans un ciel clair permet au rayonnement solaire direct d'entrer dans un local. Ainsi, dans la simulation d'un ciel clair avec soleil, le rayonnement solaire direct trace une zone extrêmement lumineuse sur le plan de travail, ce qui porte l'éclairage du côté ouest, à proximité de l'ouverture, à près de 20 000 lx. Dans ce dernier cas, l'éclairage au fond du local vaut environ 500 lx. La lumière solaire disponible diminue donc fortement lorsque le ciel se couvre.

**La couverture nuageuse,
qui détermine le type
de ciel, a une influence
importante sur l'éclairage
naturel disponible au sol.**



Couverture nuageuse. 1



2 Influence du type de ciel sur l'éclairage intérieur.

Complémentarité éclairage naturel / thermique

Si les fenêtres apportent au bâtiment des gains solaires bénéfiques en hiver, ceux-ci peuvent s'avérer trop importants en été. Il s'agit alors de limiter ces apports, soit en diminuant la taille de la fenêtre, soit en plaçant un ombrage. La quantité d'éclairage naturel pénétrant dans le bâtiment est alors diminuée.

Le choix de la position, de la taille et de la forme de la fenêtre, ainsi que du type de vitrage doit résulter d'un compromis entre les besoins de lumière naturelle, les besoins de gains solaires en hiver et la nécessité de limiter ceux-ci en été.

D'une manière plus générale, ce choix doit tenir compte des diverses fonctions que la fenêtre doit remplir pour le bâtiment considéré (figure 1). Parmi ces fonctions, on trouve les besoins de ventilation, de vue vers l'extérieur et la limitation des problèmes acoustiques.

Complémentarité éclairage naturel / acoustique

Dans la plupart des cas, la fenêtre est le point faible acoustique d'une paroi extérieure d'un bâtiment.

Deux raisons expliquent ce fait :

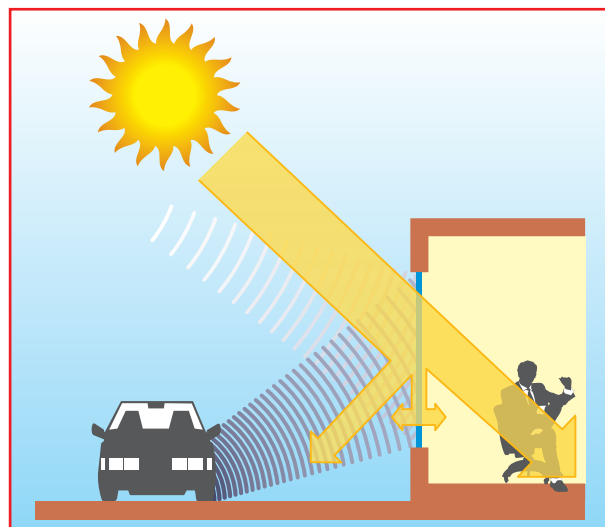
- le vitrage a habituellement un plus faible isolement acoustique que les murs ;
- lorsqu'une fenêtre est ouverte, de manière à participer à la ventilation du bâtiment, son isolement acoustique est encore plus faible.

Il est important de savoir que l'isolation acoustique d'un vitrage dépend de la fréquence du bruit dont on veut se protéger. Un vitrage efficace par rapport à des bruits de trafic urbain lent n'est, par exemple, pas efficace par rapport à des bruits de trafic autoroutier ou ferroviaire rapide. Quand on désire installer un vitrage acoustique, il est donc important de savoir de quel type de bruit on veut se protéger.

Le tableau présenté à la figure 2 donne la valeur de l'indice pondéré d'affaiblissement acoustique R_w (tel que définit par la norme EN ISO 717-1) de différents vitrages (sans tenir compte du châssis). Cet indice reflète l'isolation acoustique d'un vitrage. Nous observons qu'un double vitrage composé de deux vitrages de 6 mm séparés par un intercalaire de 12 mm rempli d'air a un moins bon indice qu'un simple vitrage de 6 mm. En substituant un gaz spécial à l'air sec, on peut enregistrer des gains appréciables dans les moyennes et hautes fréquences mais pas vis-à-vis des basses fréquences (trafic urbain, par exemple). L'amélioration la plus intéressante est l'utilisation de PVB (butyral de polyvinyle) qui, dans sa version améliorée, permet de dépasser le seul cadre de l'acoustique pour rejoindre celui des vitrages de sécurité et de la protection contre les effractions.

Notons que les techniques actuelles de construction de châssis permettent d'atteindre des valeurs extrêmes de 50 dB grâce à une double fenêtre formée de deux châssis totalement désolidarisés.

Les fenêtres ont des fonctions variées, qui vont au-delà de la seule entrée d'éclairage naturel. En plus du fait qu'elles réalisent le lien entre l'intérieur et l'extérieur, elles remplissent également des fonctions thermiques, de ventilation, et acoustiques.



Les fonctions d'un vitrage. 1

Type de vitrage	Indice pondéré d'affaiblissement acoustique (Rw)
Simple vitrage 6 mm	34 dB
Vitrage thermique à lame d'air 6 mm - air 12 mm - 6 mm	32 dB
Vitrage feuilleté 6 mm - 8 couches PVB - 6 mm	39 dB
Vitrage thermique avec gaz spécial 6 mm - gaz 12 mm - 4 mm	38 dB
Vitrage thermique feuilleté (PVB* amélioré) 6 mm - air 12 mm - 4 mm - 2 couches de PVB* de 0,38 mm - 4 mm	40 dB
Vitrage thermique feuilleté (PVB* ordinaire) 6 mm - air 15 mm - 5 mm - 2 couches de PVB* de 0,38 mm - 5 mm	41 dB

* : butyral de polyvinyle

2 Performances acoustiques de vitrages exprimées à l'aide de l'indicateur à valeur unique (Rw).

Modification de l'éclairage au cours de la journée

Par ciel clair avec soleil, la répartition lumineuse varie fortement d'une heure à l'autre et d'un point à l'autre du local. La lumière disponible augmente jusqu'à la mi-journée, puis diminue. La figure 2 représente l'évolution de l'éclairage intérieur le 15 décembre, dans un local éclairé de manière unilatérale et dont l'ouverture est orientée au sud. Les valeurs d'éclairage obtenues à 9 heures universelles sont comprises entre 2 600 lx près de la fenêtre et 400 lx au fond du local ; tandis qu'à 13 heures universelles, l'éclairage vaut 11 000 lx sur plus de la moitié du local et 1 600 lx au fond. Le rayonnement solaire direct induit une tache de lumière qui évolue, au cours de la journée, depuis le mur ouest du local vers le mur est.

L'influence du moment de l'année

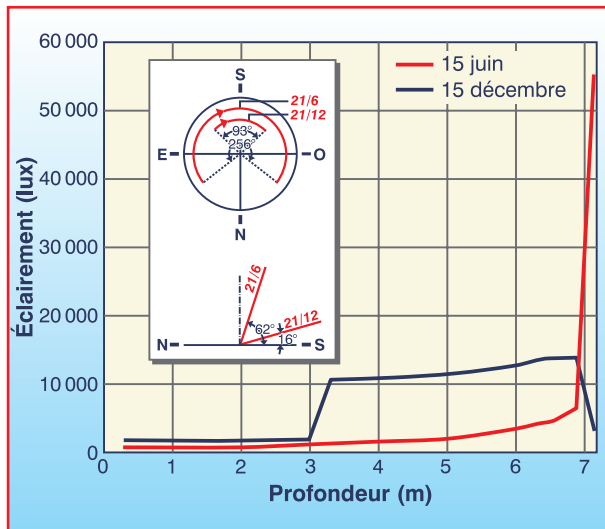
Vu l'évolution de la position de la terre par rapport au soleil au cours de l'année, nous savons que, pour une même heure, l'azimut et la hauteur du soleil varie en fonction du jour de cette année. Cette variation de position du soleil a une influence directe sur l'éclairage disponible dans un local. Étudions, par exemple, le même local que celui présenté ci-dessus, sous des conditions de ciel clair avec soleil. Si nous comparons les courbes d'éclairage intérieur obtenues par simulation, pour le 15 juin et le 15 décembre à 13 heures universelles, nous remarquons une différence de distribution de la lumière très marquée (figure 1). En été, le soleil, qui a une position très haute dans le ciel, fournit un éclairage important mais sur une faible surface du local car il pénètre très peu profondément dans le local. En hiver, l'éclairage solaire est nettement moins intensif mais pénètre beaucoup plus profondément dans le local.

La variation de l'azimut du soleil au cours de l'année est aussi très importante. Certains locaux, qui ne profitent pas ou peu de soleil direct en hiver, peuvent recevoir des apports importants lors du solstice d'été. Il s'agit en particulier des locaux orientés au nord.

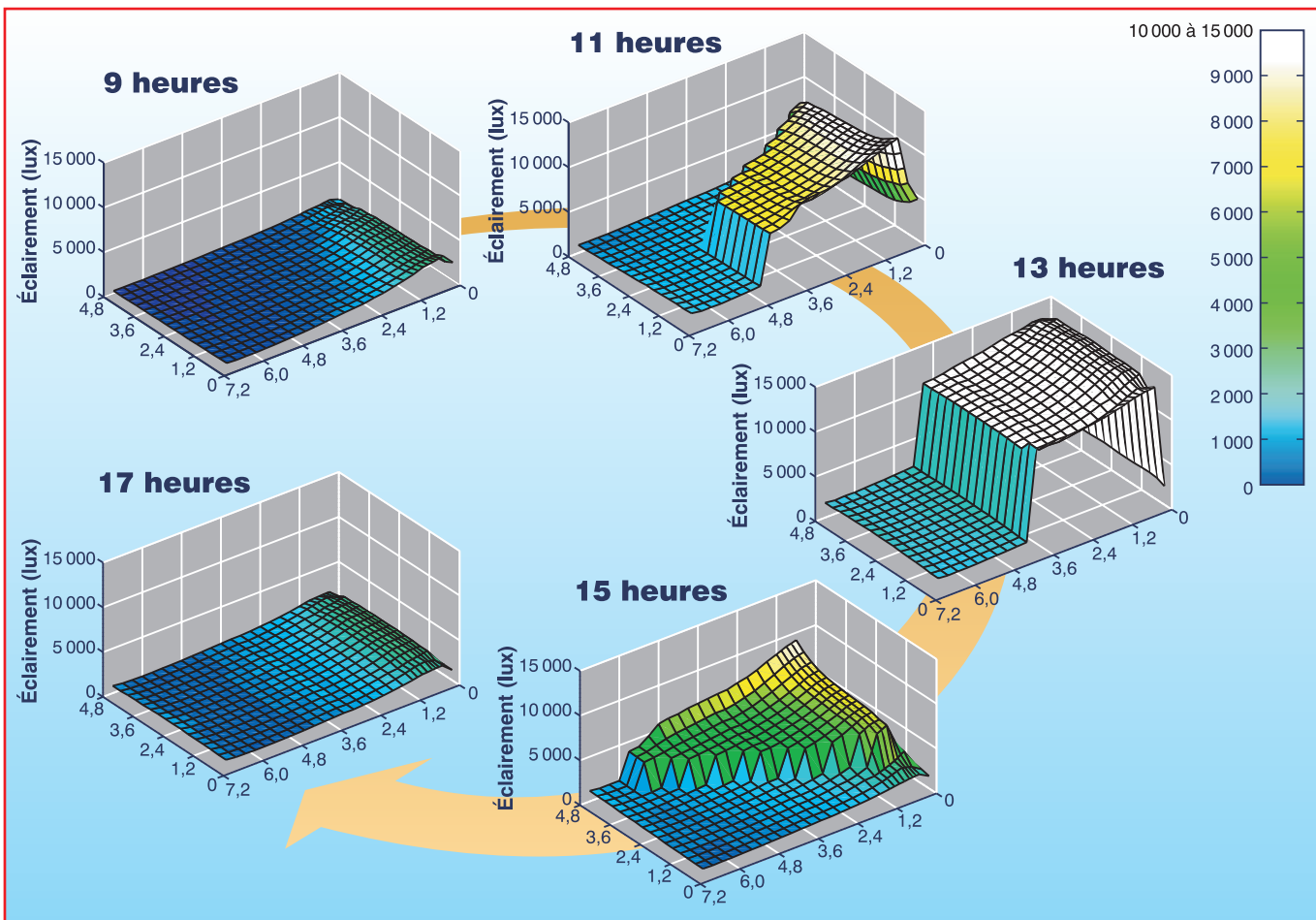
CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL
Ce qui influence l'éclairage naturel

Le ciel : incidence au cours de la journée, des saisons

La lumière naturelle traduit les fluctuations de l'état du ciel. Elle est composée de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse du ciel.



Influence de la saison sur l'éclairage intérieur d'un local. **1**



2 Influence de l'heure sur l'éclairage intérieur d'un local.

Le coefficient de réflexion lumineuse du sol est appelé "albedo". Des surfaces de sol claires et réfléchissantes (dallage brillant ou plan d'eau, par exemple) peuvent contribuer à capter d'avantage de lumière. Ainsi, l'eau, en réfléchissant le ciel et l'environnement, intensifie l'impression lumineuse d'un lieu (figure 1).

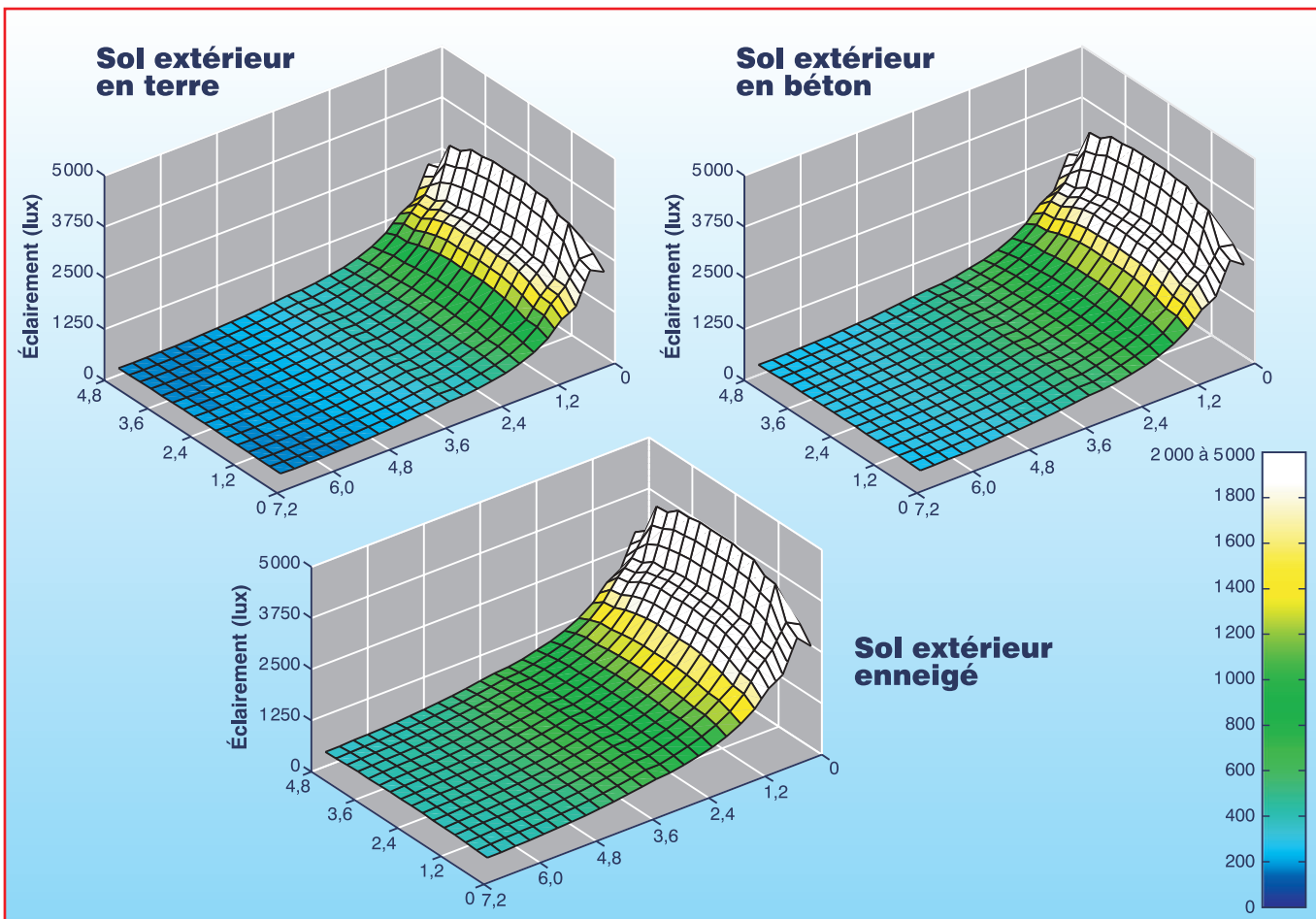
Les graphes présentés à la figure 2 montrent la variation de la lumière naturelle dans un bâtiment en fonction du coefficient de réflexion du sol qui entoure le bâtiment, le 15 juin à 13 heures universelles sous ciel couvert. Trois matériaux différents ont été modélisés : la terre ($\rho = 22\%$), le béton neuf ($\rho = 35\%$) et la neige ($\rho = 90\%$). Le local est d'autant mieux éclairé que le coefficient de réflexion est élevé.

L'emploi de matériaux réfléchissants peut également influencer l'exposition effective d'un bâtiment. Un édifice orienté au nord et doté de larges vitrages clairs, pour tirer parti de la lumière naturelle, peut se trouver dans une situation sud si on construit en face de lui un bâtiment équipé de vitrages réfléchissants, précisément pour se protéger de l'ensoleillement. À l'évidence, les conditions de confort du premier bâtiment sont profondément modifiées par la construction du second.

La quantité de lumière naturelle réfléchi sur les surfaces extérieures au bâtiment dépend principalement des facteurs de réflexion de ces surfaces.



Réflexion du soleil sur un plan d'eau extérieur. **1**



2 Influence de l'albédo sur l'éclairage intérieur d'un local.

En ville, en hiver, il est parfois difficile de capter quelques rayons solaires à cause des bâtiments voisins qui leur font écran.

La quantité d'énergie solaire reçue en un endroit dépend souvent de l'ombrage des bâtiments voisins. Dans le nord de la France, en hiver, la hauteur du soleil est très faible. Tous les masques de l'environnement, immeubles ou grands arbres, qui interceptent le soleil pendant cette période, gêneront grandement l'utilisation de la lumière naturelle.

Les simulations présentées à la figure 1 donnent la distribution de l'éclairage à l'intérieur d'un local situé en site parfaitement dégagé et d'un local obstrué par un bâtiment de 30 m de long et de 15 m de large, placé parallèlement au local considéré, à 18 m de la fenêtre. Cet obstacle correspond à un angle d'obstruction horizontal de 40° et un angle d'obstruction vertical de 37° depuis le milieu de la fenêtre. La quantité de lumière intérieure est fortement réduite à cause de ce bâtiment : sous ciel couvert, le 15 décembre à 13 heures universelles, l'éclairage n'est plus que de 80 lux à 2 m de la fenêtre, pour le local masqué, alors que, sans ce masque urbain, il y aurait environ 200 lux au même endroit.

Lors de la conception d'un bâtiment en site non dégagé, il importe de mesurer l'impact de l'effet de masquage produit par les bâtiments et les autres obstructions voisines. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer précisément les périodes pendant lesquelles le rayonnement solaire se trouve intercepté par un obstacle avant d'atteindre le bâtiment.

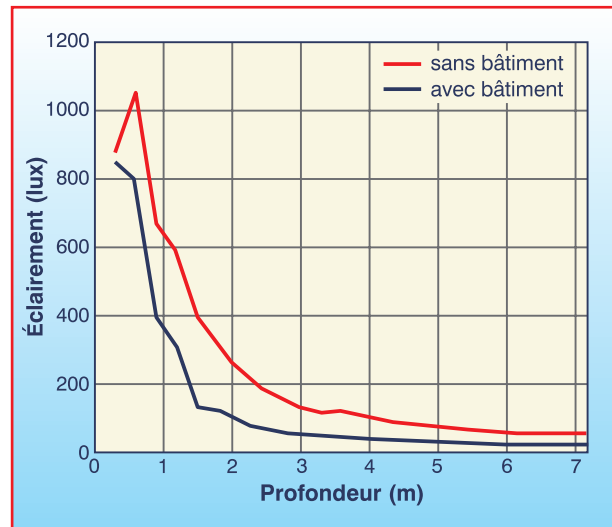
C'est la géométrie solaire qui détermine l'ombrage créé par les masques solaires. Cet ombrage varie heure par heure, jour par jour et peut se calculer à partir des diagrammes solaires. Il existe également des logiciels qui calculent les ombrages pour un site défini.

S'il est essentiel de tenir compte des ombrages provoqués par les obstacles avoisinant le terrain considéré, il faut également prendre en considération l'évolution de ce site dans l'avenir (bâtiments futurs...).

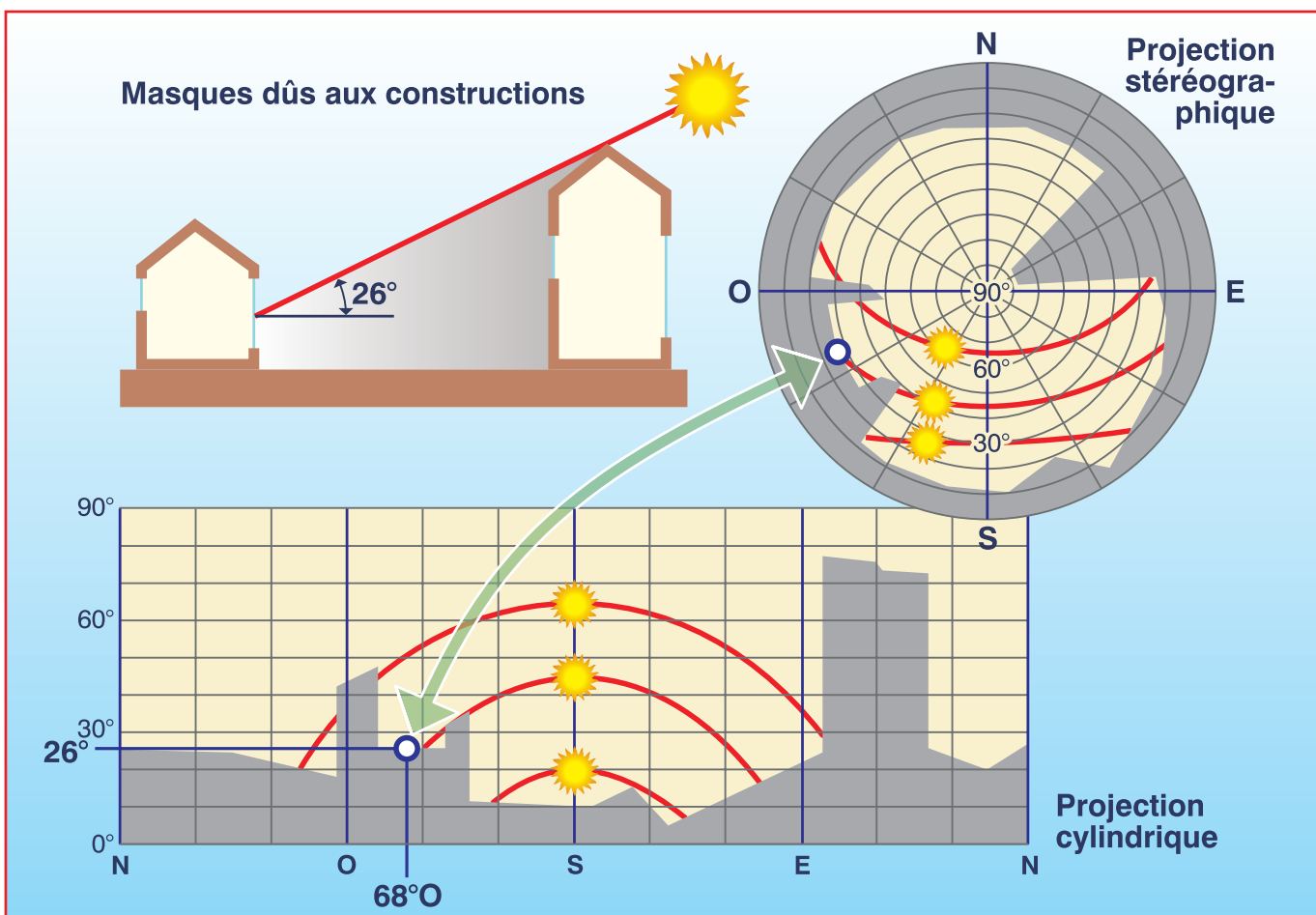
La méthode des projections solaires cylindriques (figure 2b) détermine les masques solaires que subit un bâtiment particulier, par la transcription de son panorama sud sur le diagramme solaire relatif à la latitude du lieu considéré.

La végétation peut aussi réduire l'exposition d'un bâtiment au soleil. Les arbres à feuilles caduques sont particulièrement intéressants sur le plan du contrôle solaire puisqu'ils perdent leurs feuilles en automne et qu'elles repoussent au printemps, ce qui permet de profiter de la lumière naturelle en hiver tout en créant un ombrage en été. Les paramètres influençant les facteurs de transmission et d'absorption lumineuse d'un arbre sont sa hauteur à maturité, sa vitesse de croissance, l'apparence de ses feuilles et leur mode de chute, ainsi que la distance des branches au sol.

On appelle masque solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface que l'on désire ensoleiller. Les masques lointains sont occasionnés par le relief, les bâtiments voisins ou encore la végétation.



Influence d'une obstruction **1** sur l'éclairage intérieur.



2 Mesure de l'impact des masques lointains.

Ces masques proches, qui font partie intégrante du bâtiment, sont en général intégrés à celui-ci pour lutter contre les problèmes de surchauffe et d'éblouissement. Ils appartiennent donc à la grande famille des protections solaires.

La mise en place d'auvents ou de surplombs fixes destinés à réduire les problèmes d'éblouissement et de surchauffe pénalisera bien sûr la quantité de lumière captée par le bâtiment. En général, il est souhaitable, pour le nord de la France, par exemple, que les angles d'obstruction ne dépassent pas 45° pour l'angle horizontal et 25° pour l'angle vertical.

Le grand avantage de ce type de protection solaire est que, par ciel serein, elles protègent principalement des rayons directs du soleil, qui sont toujours les plus critiques, alors que le rayonnement diffus n'en est que très peu affecté. Cependant, une protection fixe efficace en été réduit l'éclairage naturel par ciel couvert. Rappelons que sous les latitudes du nord de la France, la probabilité d'ensoleillement est inférieure à 20 % en hiver et à 50 % en été.

Le pourcentage d'ombrage de la fenêtre par un élément fixe dépend :

- de la position de la protection par rapport à la fenêtre ;
- de la hauteur du soleil ;
- du rapport entre les dimensions de la protection et la hauteur ou la longueur de la fenêtre.

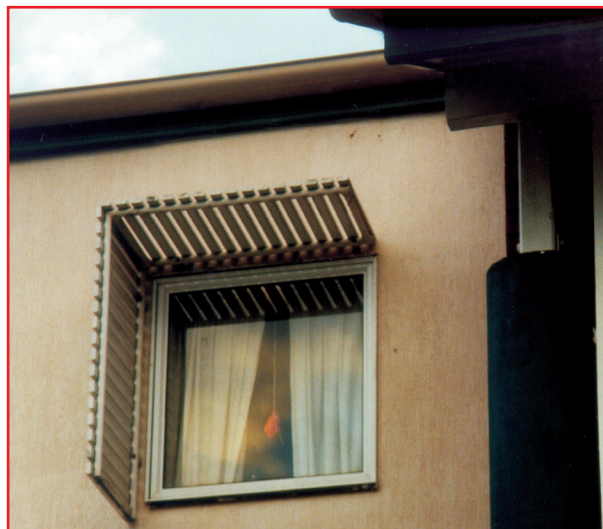
Les façades d'orientation proche du sud sont les plus faciles à protéger par cette technique. Une protection fixe est à même d'éliminer complètement le rayonnement direct estival sur une ouverture orientée au sud, mais ne peut pas supprimer les risques d'éblouissement dus à un soleil bas en hiver. En revanche, aucune protection fixe, horizontale ou verticale, ne permet de résoudre le problème propre aux façades est et ouest.

Dimensionnement d'un auvent

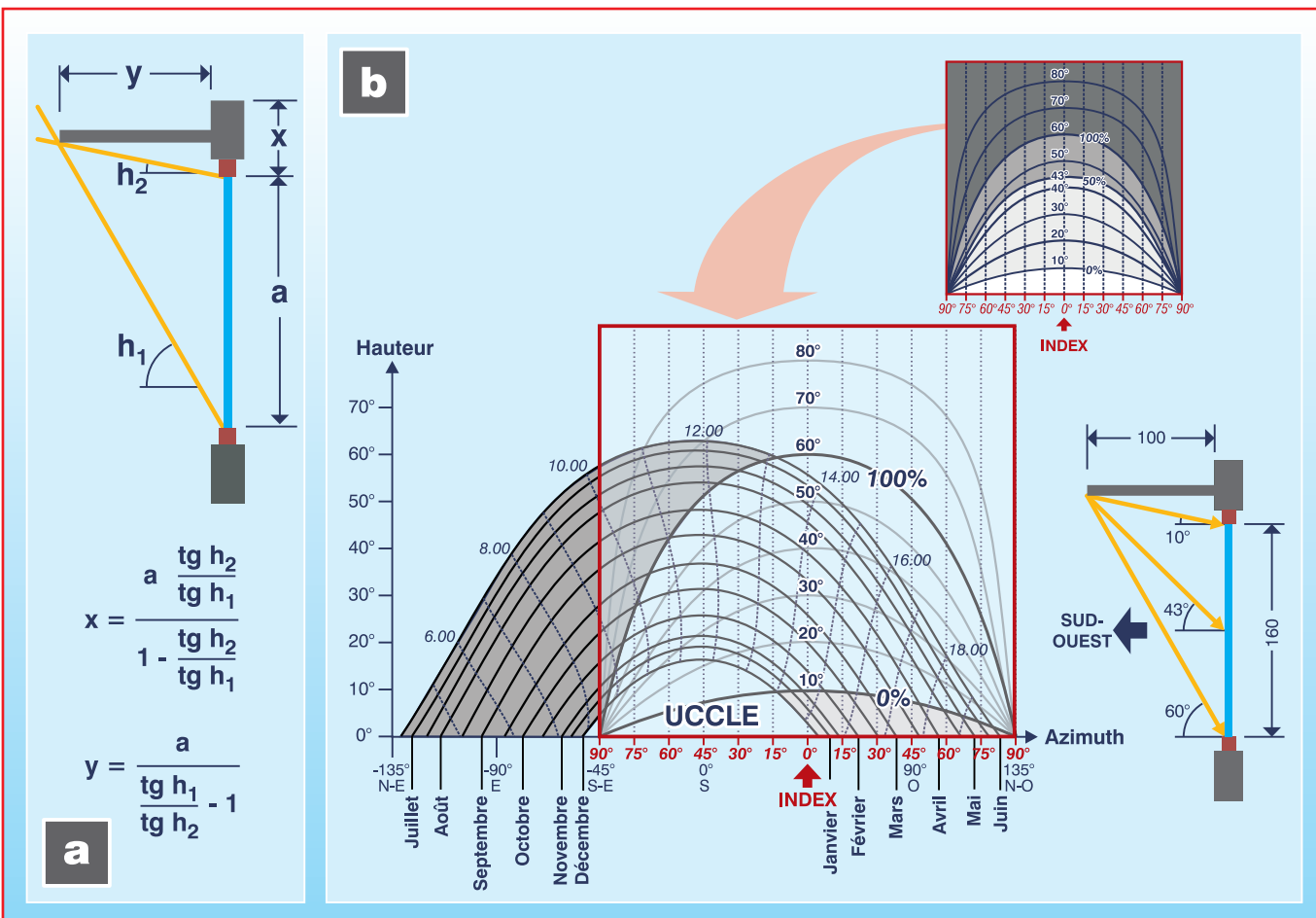
Il existe plusieurs méthodes permettant le dimensionnement d'un auvent. Elles peuvent être manuelles ou informatisées. La difficulté réside dans le choix des critères à appliquer. La figure 2a montre comment dimensionner un auvent pour que son ombrage soit maximal à un moment de l'année, et minimal à un autre moment (par exemple, respectivement aux solstices d'été et d'hiver). Les calculs sont basés sur la hauteur du soleil à ces moment-là (respectivement h_1 et h_2).

Comme pour les masques lointains, on peut tracer des courbes, appelées dans ce cas-ci, indicateurs d'occultation, qui permettent d'étudier les protections solaires associées à un auvent. En superposant cet indicateur au diagramme solaire du site étudié, on détermine avec précision les heures et les jours pendant lesquels la paroi ne reçoit pas de rayonnement solaire direct. L'indicateur d'occultation permet d'établir une description géométrique simple des avancées architecturales ; il est indépendant de la latitude du site, de l'orientation de la baie et de l'heure de la journée. Le profil d'ombre établi pour une protection solaire déterminée pourra donc servir sur n'importe quel diagramme solaire, c'est-à-dire sous toute latitude.

Des éléments architecturaux liés au bâtiment lui-même, tels que des murs de refends, des surplombs, des light-shelves... peuvent provoquer un ombrage qui dépend de leur taille, de leur réflectivité et de leur orientation. On les appelle les masques proches.



Les masques proches. 1



2 a : Dimensionnement d'un auvent.

b : Étude des protections solaires associées à un auvent par la méthode des indicateurs d'occultation.

Profondeur du local

Il existe une règle de bonne pratique selon laquelle la profondeur de pénétration de l'éclairage naturel dans un local vaut 1,5 fois la hauteur du linteau de la fenêtre, par rapport au sol, pour une fenêtre classique. Dans le cas d'une fenêtre orientée au sud et équipée d'un lightshelf, cette valeur peut atteindre 2 fois la hauteur du linteau de la fenêtre, par rapport au sol (figure 1).

Pour un local éclairé unilatéralement, les niveaux d'éclairement chutent au-delà d'une certaine profondeur. On conseille dès lors de placer au moins 80 % des surfaces de travail en deçà de cette limite. Pour éclairer naturellement toute la surface d'un local, il est donc préférable de limiter sa profondeur.

La figure 2a donne la distribution de l'éclairement sur le plan de travail, dans un local éclairé unilatéralement, par une ouverture orientée au sud. La profondeur de ce local varie de 4,8 m à 7,2 m. Nous observons, quel que soit le type de ciel, que l'augmentation ou la diminution de la profondeur du local ne change pratiquement rien à la distribution des éclairements dans celui-ci. L'éclairement est juste un tout petit peu plus important en fond de pièce pour le local moins profond. Cela provient de la réflexion de la lumière sur le mur de fond du local.

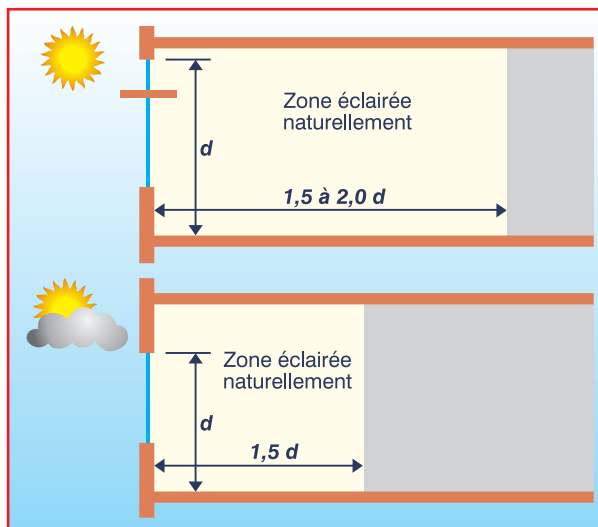
Largeur du local

Le niveau d'éclairement est d'autant plus élevé dans un local que celui-ci est large, à condition que le rapport de la surface vitrée sur la surface au sol soit constant (pour une profondeur invariable).

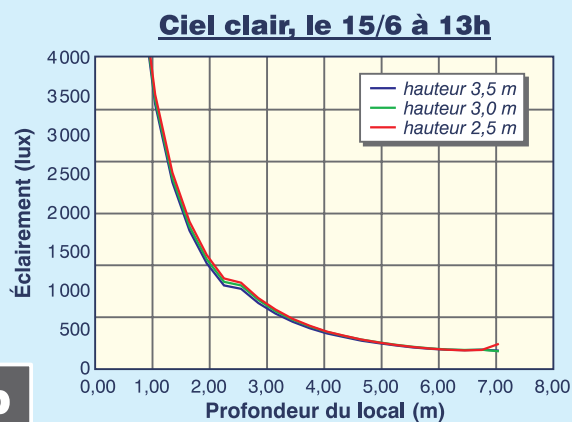
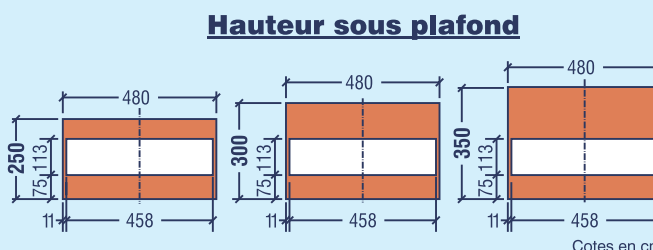
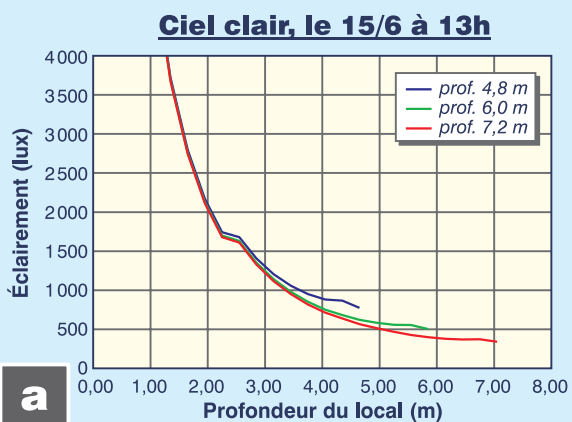
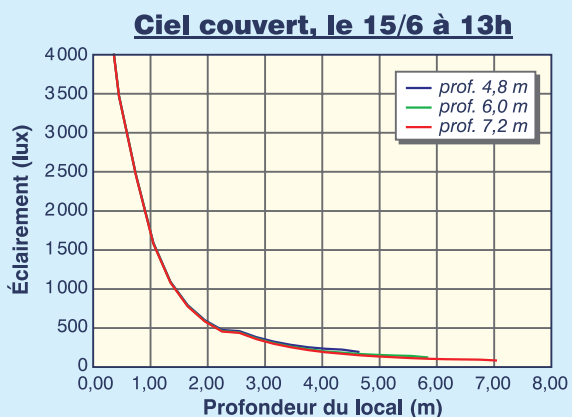
Hauteur sous plafond

Une hauteur sous plafond différente pour une même baie vitrée, située à même hauteur du sol, induit de très faibles différences dans la répartition lumineuse de ces locaux. Le niveau d'éclairement est cependant un tout petit peu plus élevé dans les locaux ayant un plafond plus bas (figure 2b).

La lumière naturelle ne pénètre significativement qu'à environ une distance d'une fois et demie la hauteur du linteau de la fenêtre par rapport au sol.



Profondeur de la zone éclairée naturellement. **1**



2 a : Influence de la profondeur du local.
b : Influence de la hauteur sous plafond.

En général, tout système d'éclairage naturel donne de mauvais résultats lorsque les surfaces de la pièce sont sombres. L'utilisation de parois et de meubles de couleur claire influence fortement la luminosité d'un local. L'importance de la clarté de la finition des surfaces est due à un double effet :

- les facteurs de réflexion plus élevés permettent à la lumière d'être davantage réfléchi ;
- l'œil humain analyse des niveaux de luminance : sous les mêmes conditions d'éclairage, une surface claire est donc subjectivement perçue comme mieux éclairée qu'une surface foncée.

Lorsque les matériaux de revêtement d'un local quelconque présentent une certaine brillance, on constate que la lumière arrive plus facilement en fond de pièce. En contrepartie, les surfaces en question acquièrent une luminance élevée et peuvent donc devenir des sources d'éblouissement pour l'utilisateur. De manière générale, les surfaces brillantes sont donc à conseiller comme moyen de transmission de la lumière naturelle, mais elles sont à éviter dans les locaux de travail, dans la mesure où les activités effectuées (lecture, écriture...) peuvent être fortement perturbées lorsque l'environnement lumineux est fort contrasté.

Généralement, les coefficients de réflexion des murs, du plancher et du mobilier situés à proximité de la fenêtre jouent un rôle principal dans le jeu des réflexions intérieures. Dans une moindre mesure, les réflexions sur le plafond et les murs plus éloignés des ouvertures peuvent aussi améliorer la distribution lumineuse.

On peut dire que si le facteur de réflexion moyen des murs d'un volume quelconque est inférieur à 50 %, la lumière pénétrera difficilement en profondeur dans cet espace.

Par ciel couvert, la plus grande partie de la lumière provient du haut de la voûte céleste : en conséquence, les surfaces horizontales reçoivent une plus grande quantité de lumière que les surfaces verticales. La photométrie des murs a donc une influence sur la répartition de la lumière qui peut être qualifiée de moyenne. En revanche, dès que des rayons solaires frappent directement un mur intérieur, la photométrie de celui-ci va jouer un rôle essentiel sur la répartition des éclairages.

Le sol et le mobilier d'un espace quelconque constituent donc des plans et des surfaces très éclairés, notamment à proximité des ouvertures. Pour cette raison, toute variation de photométrie de ces surfaces entraîne des répercussions importantes sur la distribution des éclairages intérieurs. Dès lors, si l'on désire favoriser la pénétration de la lumière en profondeur dans un local, il vaut mieux préconiser un revêtement du sol et du mobilier relativement clair, possédant donc un facteur de réflexion élevé. De plus, la clarté des tables de travail s'avère un élément favorable au confort visuel dans la mesure où la réduction du contraste entre le papier et le support de la table induit une diminution des efforts d'accommodation que l'œil doit effectuer à chacun de ses mouvements.

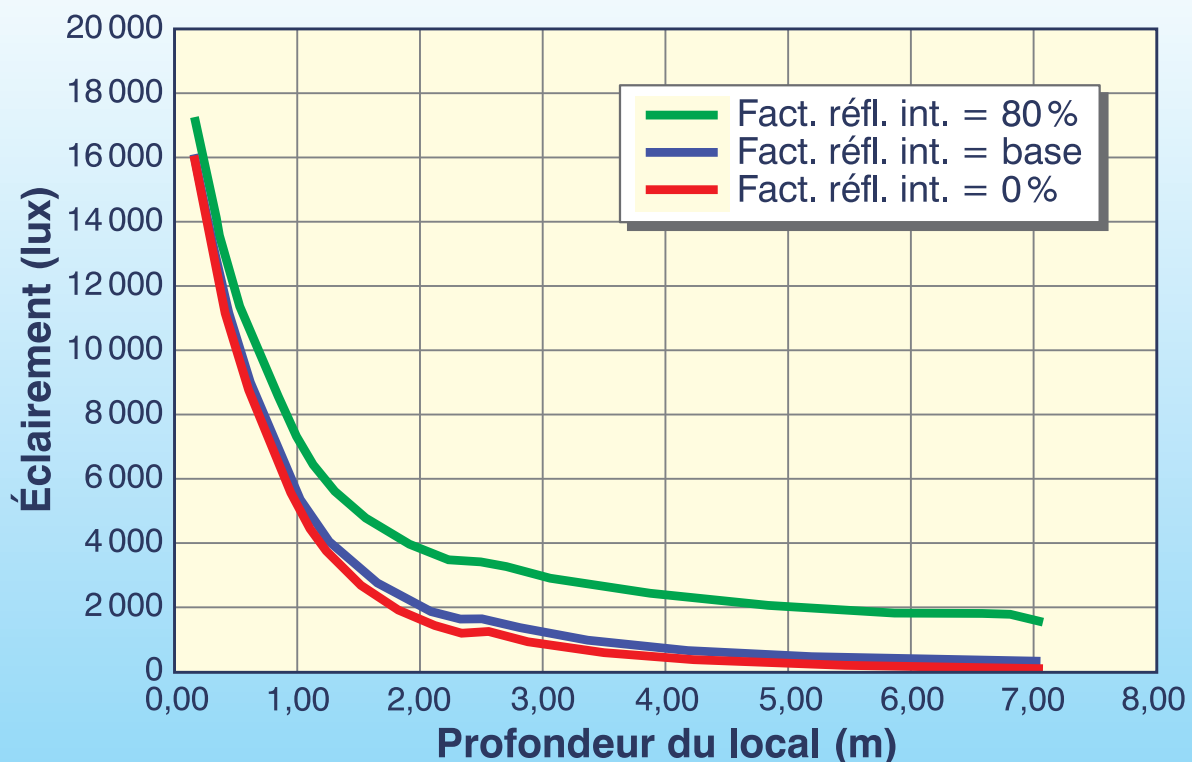
Les meubles sont parfois de réels obstacles qui empêchent la transmission de la lumière vers certaines parties de la pièce. Il est donc essentiel de réfléchir aux types de meubles à choisir ainsi qu'à leur emplacement de manière à favoriser la pénétration de la lumière naturelle.

La nature et la couleur des surfaces intérieures (parois et mobilier) influencent directement l'éclairage naturel dû aux réflexions intérieures. Ainsi, une bonne distribution de la lumière dans tout l'espace nécessite l'utilisation de parois de couleurs claires.



Des parois de couleurs claires favorisent la répartition de la lumière. **1**

Ciel clair, le 15/06 à 13h



2 Influence du coefficient de réflexion des parois sur l'éclairage intérieur.

La dimension de l'ouverture

Lorsque la surface vitrée d'un local augmente, pour une même surface de plancher, la disponibilité d'éclairage naturel à l'intérieur de ce local augmente également.

Le type et la taille du châssis employé modifient la vue vers l'extérieur et la quantité de lumière admise dans un édifice. Le châssis fixe reste le châssis préférentiel lorsque les exigences de ventilation et d'accès ne demandent pas d'ouvrir les fenêtres. En effet, sa structure mince laisse pénétrer un maximum de lumière. Toutefois, il faut aussi prévoir des fenêtres ouvrantes pour satisfaire les besoins de contact direct avec l'extérieur, de renouvellement d'air et de maintenance.

Le choix du matériau utilisé pour le châssis détermine également l'encombrement de celui-ci par rapport à la lumière naturelle. Les châssis réduisent les surfaces vitrées et absorbent une partie de la lumière du jour. En général, un châssis en bois est plus mince qu'un cadre en aluminium à coupure thermique. Les châssis en PVC sont les plus larges.

Des innovations récentes permettent de plus en plus de diminuer l'impact visuel des châssis et d'augmenter ainsi la taille des surfaces vitrées et la quantité de lumière qu'elles laissent passer.

Pour maximiser les apports de lumière naturelle, on peut augmenter la prise de contact avec l'extérieur en créant des décrochements, des subdivisions, des ondulations de la façade...

Signalons que le fait d'interrompre un faux-plafond à proximité de la fenêtre permet d'augmenter la hauteur du vitrage et donc de favoriser la pénétration de la lumière naturelle par cette ouverture. Ce procédé est connu sous le nom de plafond biaisé (figure 1).

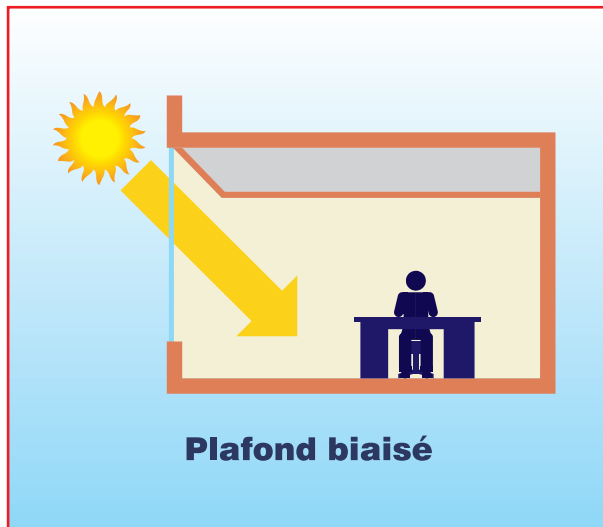
La forme de l'ouverture

Lorsque la largeur d'une fenêtre diminue, à surface vitrée identique, la répartition devient moins uniforme, bien que l'éclairement moyen ne varie que très peu. Par contre, l'éclairement du fond du local augmente avec la hauteur de la fenêtre. Pour une même surface vitrée, une fenêtre haute éclaire davantage en profondeur (figure 2a). L'idéal réside donc dans une fenêtre horizontale mais dont le linteau est élevé.

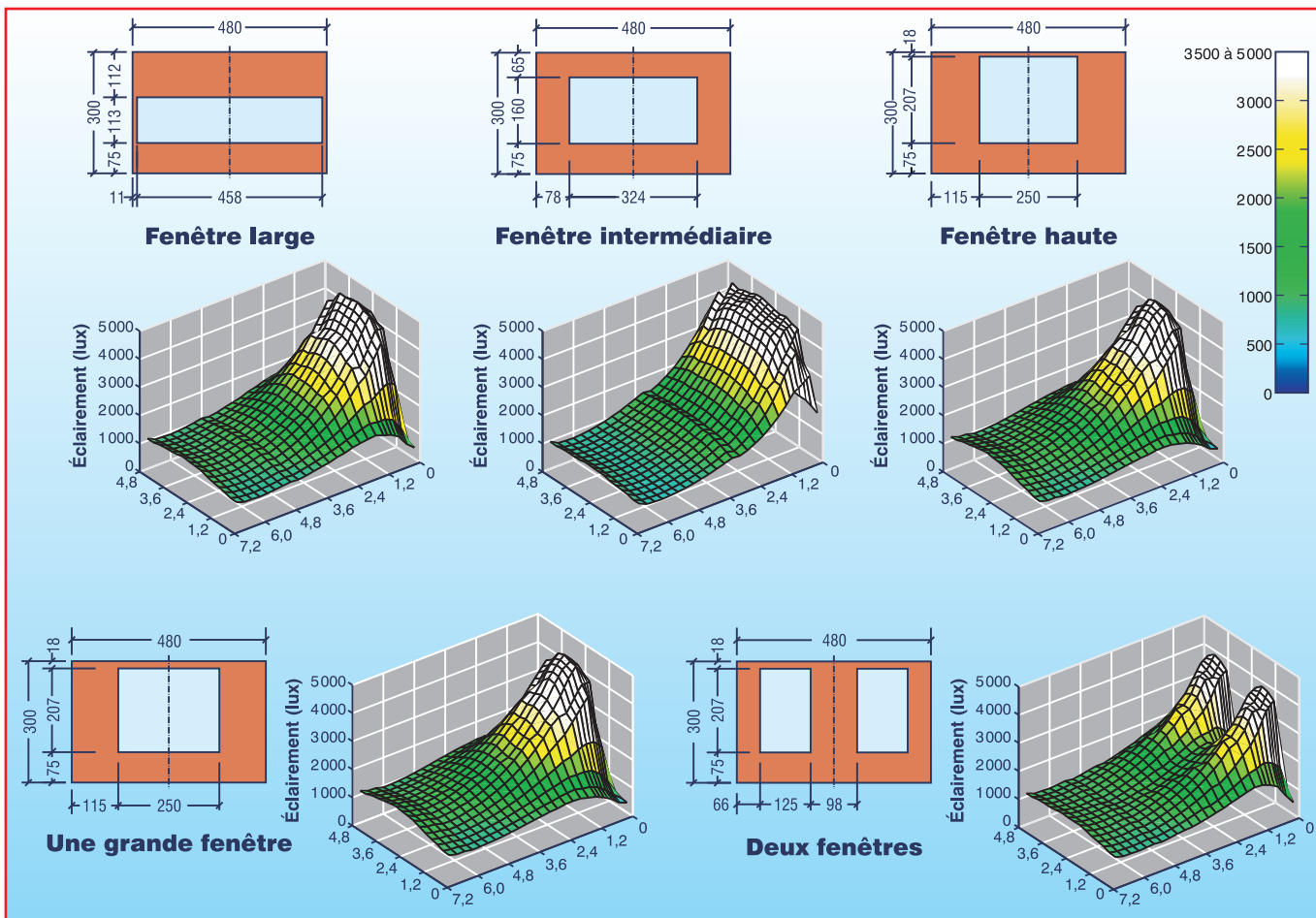
Comparons deux configurations qui diffèrent uniquement par le fait que l'une est composée d'une seule fenêtre centrée et que l'autre présente deux fenêtres placées symétriquement par rapport au milieu de la façade (figure 2b). Dans les deux cas, les fenêtres ont une superficie vitrée totale identique et la même hauteur ; leur allège est située au même niveau par rapport au sol. La moyenne des éclairagements varie peu mais la répartition de la lumière dans la partie du local avoisinant les fenêtres est différente. Dans le cas de deux fenêtres séparées, une zone d'ombre apparaît entre celles-ci, ce qui peut créer des problèmes de confort visuel pour les occupants.

Toutes ces simulations ont été réalisées pour un ciel clair le 15 décembre à 13 heures universelles, dans un local orienté vers le sud.

**La taille des ouvertures
d'un bâtiment est un
élément déterminant de la
quantité de lumière
extérieure qui parvient à
l'intérieur des locaux.**



Plafond biaisé. 1



2 Influence de la forme de l'ouverture sur l'éclairage intérieur.

La position de l'ouverture

La figure 2 montre la répartition de l'éclairage dans un local éclairé par une fenêtre placée à trois hauteurs différentes. Elle montre que plus la fenêtre est élevée, mieux le fond du local est éclairé et plus la zone éclairée naturellement est profonde. Sous un ciel clair le 15 juin à 13 heures universelles, un local orienté au sud reçoit en fond de local 350 lx pour la fenêtre basse, 450 lx pour la fenêtre à mi-hauteur et 500 lx pour la fenêtre haute.

Remarquons également que la courbe d'éclairage change de forme en fonction de la hauteur de l'allège : exponentielle lorsque l'appui de fenêtre est à la hauteur du plan de travail, la courbe d'éclairage prend une forme de cloche qui s'accroît au fur et à mesure que la fenêtre s'élève. Il y a donc création d'une zone d'ombre à proximité de la fenêtre d'autant plus importante que l'allège de l'ouverture est haute.

La transparence

La quantité et la qualité de la lumière naturelle transmise à l'intérieur d'un local par une ouverture dépendent du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur, de son état de propreté et du nombre de couches de verre utilisées.

La lumière qui rencontre un vitrage est transmise, absorbée et réfléchiée, selon des proportions qui dépendent en grande partie du type de vitrage. Le choix du vitrage influence non seulement la lumière transmise mais aussi les gains solaires et les pertes de chaleur à travers la fenêtre. La transmission lumineuse et énergétique d'un vitrage peut être caractérisée par trois paramètres :

- son facteur de transmission lumineuse ;
- son facteur solaire ;
- son coefficient de conduction thermique.

Le facteur de transmission lumineuse ou TL est le pourcentage du rayonnement solaire visible transmis à travers une paroi. La quantité de lumière qui pénètre dans le bâtiment est d'autant plus grande que le facteur de transmission lumineuse d'un vitrage est élevé.

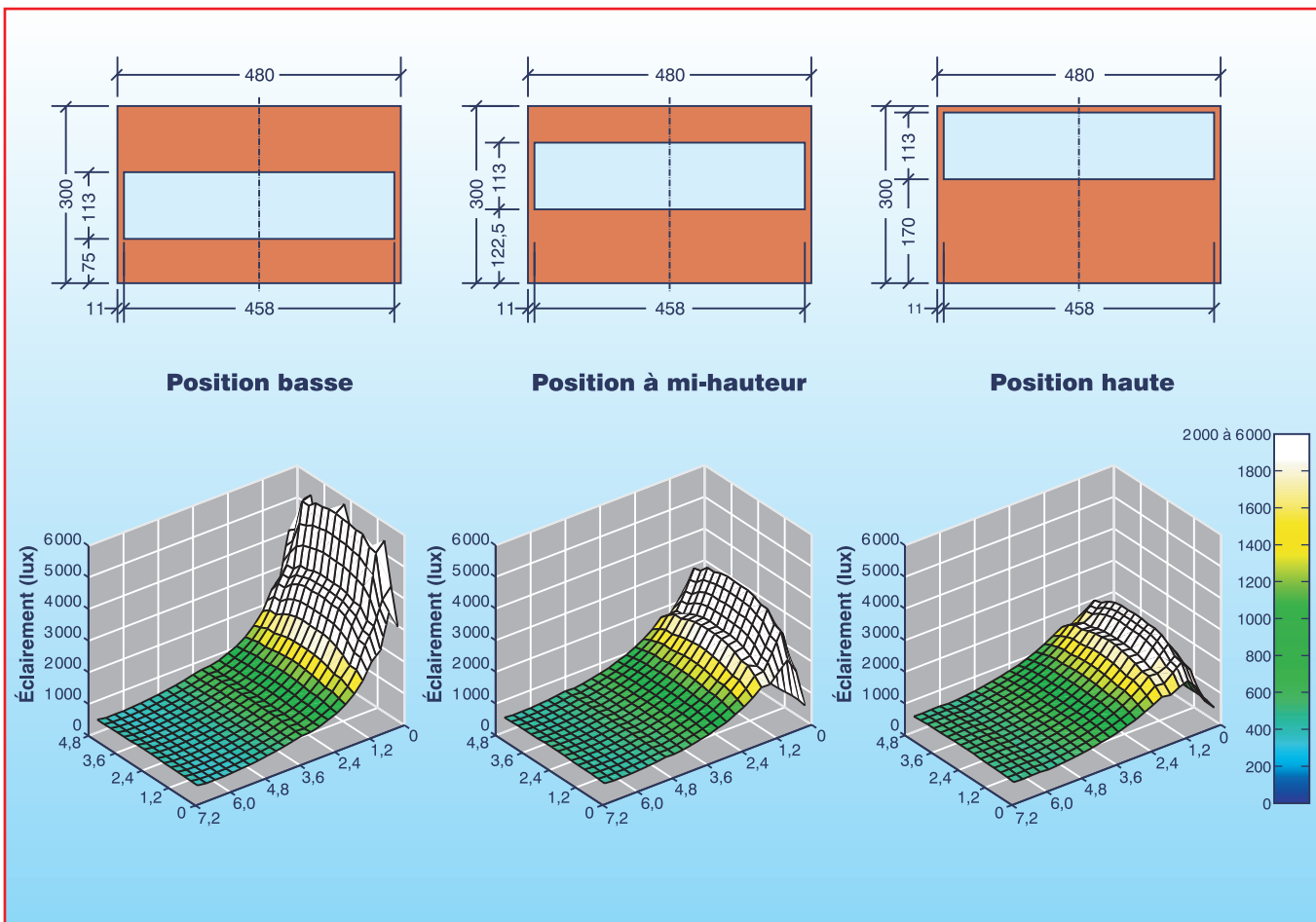
Le type de vitrage (simple, double, absorbant, réfléchissant...) affecte directement la transmission lumineuse à travers la fenêtre. Les vitrages clairs sont connus pour leur haute capacité à laisser passer la lumière à l'intérieur des bâtiments. La figure 1 rapporte les coefficients de transmission lumineuse de différents types de vitrages.

Signalons que la transmission lumineuse d'un vitrage dépend fortement de son facteur de maintenance.

L'emplacement de l'ouverture dans la façade exerce une grande influence sur la pénétration de la lumière dans le local.

Type de vitrage	Facteur de transmission lumineuse (%)
Simple vitrage clair 6 mm	89
Clair 6 mm / air 12 mm / clair 6 mm	79
Vitrage teinté 6 mm / air 12 mm / clair 6 mm	37 à 65
Clair 6 mm / air 12 mm / clair basse émissivité 6 mm	67
Clair 6 mm / air 12 mm / réfléchissant 6 mm	6 à 69

Coefficients de transmission lumineuse de différents types de vitrages. **1**



2 Influence de la position de l'ouverture.

Les formes restent constantes mais la lumière naturelle est perpétuellement changeante, du point de vue qualitatif comme sur le plan quantitatif. Nous percevons la stabilité de la forme, nous la ressentons comme un élément fixe, mais sa présentation peut changer totalement lorsque la lumière varie.

D'autre part, la forme transforme la lumière, comme le son et la chaleur ; elle la concentre, la réfléchit ou la disperse. Les formes répondent à la lumière qui, en retour, est modelée par elles.

La lumière accentue la forme

Nous pensons, à première vue, que la lumière met toujours la forme en évidence. En réalité, elle ne le fait pas en toutes circonstances. Nous ne voyons pas nécessairement clairement ou de la manière attendue toute forme qui se situe dans la lumière et dans notre champ visuel. Par exemple, de petits éléments en relief sur une façade peuvent être visibles au soleil grâce aux ombres projetées par les rayons solaires, alors qu'ils perdent leur impact lorsque le ciel est nuageux puisque la lumière diffuse illumine toutes les surfaces de manière équivalente.

De plus, la lumière naturelle n'accroît pas toujours les formes dans les mêmes proportions. Ainsi, l'orientation sud est la plus favorable au rendu des modelés, des avancées et des retraits sur une façade car ils sont accusés par un jeu d'ombres portées, assez constantes vu que le soleil est haut sur l'horizon. Ainsi, pour une façade sud, le modelé peut être traité vigoureusement, les avancées et les retraits peuvent être nettement découpés. Par contre, pour les orientations est et ouest, les rayons du soleil sont assez bas au commencement comme en fin de journée. Les ombres portées seront donc très variables et par moment extrêmement allongées et déformées proportionnellement à l'importance des retraits et des avancées. Il en résulte donc que le modelé des façades est et ouest devra être beaucoup plus sensible et moins accusé, puisque les variations du soleil y sont plus marquées.

La lumière dissout la forme

La lumière semble parfois dématérialiser les formes lorsqu'elles sont juxtaposées. Le résultat aboutit à des formes qui paraissent créées par et pour la lumière davantage que par la matière ou pour la structure.

Ce phénomène apparaît notamment lorsque des surfaces d'un blanc pur semblent se dissoudre dans un rayon de soleil. Cet effet ne se produit en général qu'à certains moments car il est lié à l'éblouissement engendré par la brillance de la partie touchée par le rayonnement solaire direct.

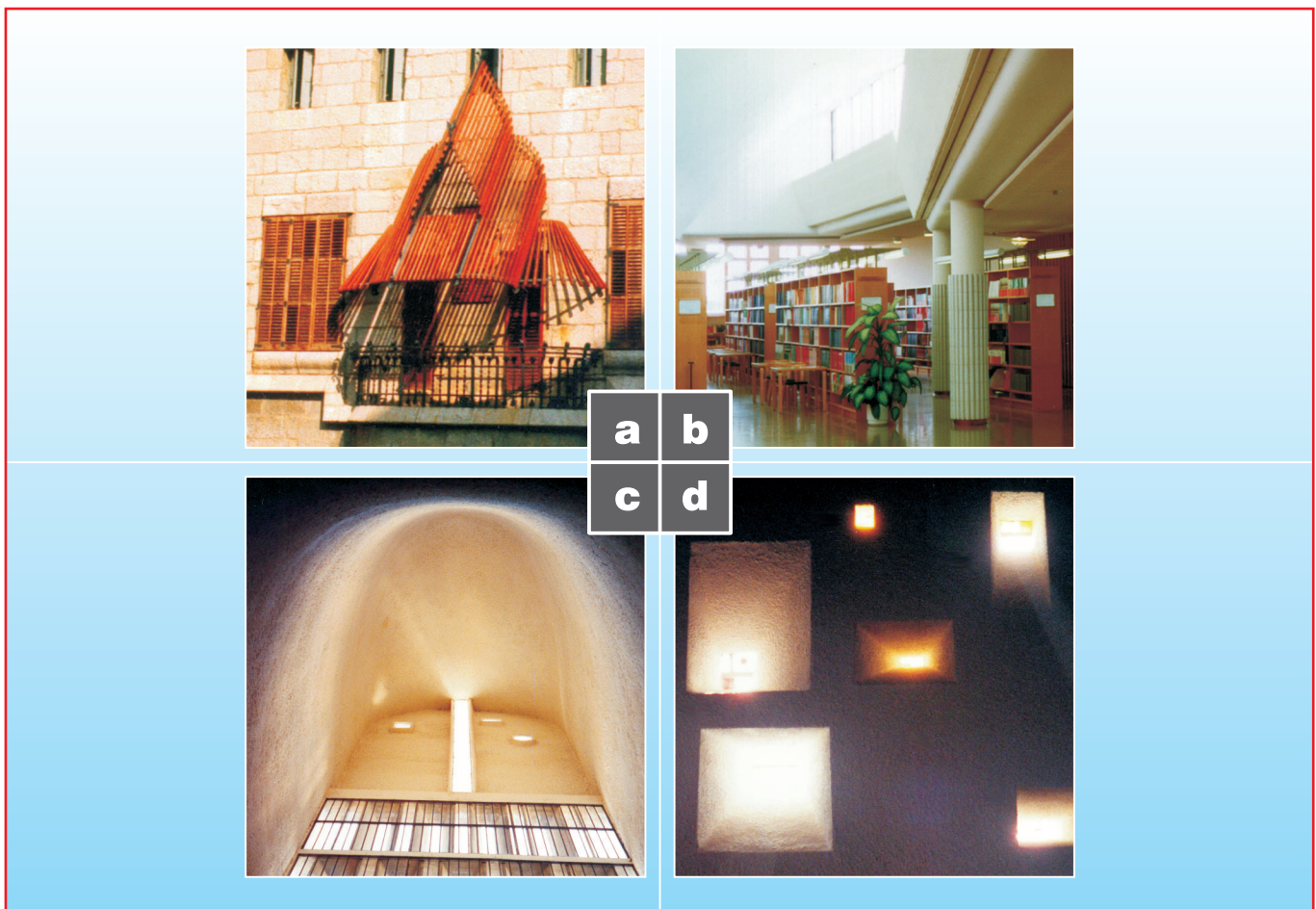
L'obscurité peut, elle aussi, brouiller la perception des formes et des matériaux.

Certains motifs de lumière et d'ombre peuvent transformer notre perception de la forme : on peut, par exemple, couvrir certaines surfaces d'un bâtiment par des figures lumineuses marquées. Par la superposition de schémas structurels et lumineux, on fait donc naître une symphonie de formes dans la lumière.

La plupart des formes que nous percevons nous sont révélées par la lumière. Ainsi, beaucoup d'œuvres architecturales admirées ont été conçues en fonction de la lumière.



Le Panthéon, Rome. 1



2 a : La lumière accentue la forme (arch. Gaudi).
b : La lumière dissout la forme.

c : La lumière accentue la forme (arch. Le Corbusier).
d : La lumière dissout la forme (arch. Le Corbusier).

Le contraste entre un objet et son environnement ou entre deux objets dépend de la différence de luminance entre ceux-ci. Cette différence de luminance provient d'une différence de couleur ou d'éclairage entre les différents objets ou entre un objet et son environnement. La direction de la lumière et la profondeur des ombres sont déterminées par la distribution spatiale et la disposition des sources lumineuses.

Pour faire ressortir au maximum le relief d'un objet, il faut accentuer l'éclairage directionnel vers celui-ci, tout en diminuant le niveau général d'éclairage à son voisinage. Les ombres sont très importantes pour déterminer la position d'un objet dans l'espace lorsqu'il n'y a pas d'autre référence. Pour certaines tâches visuelles, des effets d'ombres apportés par un éclairage spécifique peuvent être recherchés pour accentuer le relief ou la texture de certains éléments.

Pour mettre en valeur le modelé d'un objet, il convient par contre de l'éclairer sous différents angles de manière à obtenir une luminance variable sur sa surface contrastant avec celle de l'arrière-fond.

Le respect des formes peut être réalisé sans ombre portée. De plus, un éclairage qui crée des ombres portées très marquées n'assure pas nécessairement un beau modelé.

Une pénétration latérale de la lumière naturelle satisfait généralement la perception tridimensionnelle des objets et respecte leurs formes. Sous la lumière solaire dirigée, le relief et le modelé sont tous deux accentués. La répartition lumineuse est idéale mais le niveau d'éclairage diminue dès qu'on s'éloigne des fenêtres.

La lumière diffuse induit en général une sensation de monotonie et atténue le relief des éléments qu'elle éclaire, ce qui explique que l'éclairage zénithal est souvent considéré comme uniforme et morne.

Le contraste comme source d'éblouissement

La distribution lumineuse d'un espace doit être telle que les différences excessives de luminance soient évitées pour permettre aux occupants de voir correctement. Une combinaison de zones extrêmement sombres ou brillantes dans le champ visuel donnent naissance à l'inconfort visuel et doivent être évitées.

**Notre perception du relief
et du modelé des surfaces
qui nous entourent
dépend de la direction
selon laquelle la lumière
les éclaire et du type
d'ombre qu'elles créent.**



Accentuation du relief par un éclairage directionnel. **1**



a

b



2 Atténuation du relief par la lumière diffuse (arch. F. Gehry).

En éclairage unilatéral, la pénétration de la lumière est limitée en profondeur mais elle est directionnelle, ce qui est favorable à la perception du relief. Les ouvertures verticales captent au maximum les apports solaires hivernaux, tout en limitant les pénétrations solaires estivales. Elles peuvent créer de l'éblouissement et engendrent de forts contrastes dans l'espace.

Avec l'éclairage bilatéral, on obtient un éclairage plus uniforme et mieux réparti que l'éclairage unilatéral. Lorsque la lumière entre par deux côtés opposés, elle contribue encore à une meilleure pénétration lumineuse dans l'ensemble de la pièce. En général, les effets de contre-jour disparaissent lorsque les fenêtres sont bilatérales.

L'éclairage multilatéral est particulièrement indiqué dans les espaces nécessitant un éclairage très uniforme ainsi que dans les bâtiments profonds.

L'éclairage naturel provenant de plusieurs ouvertures peut s'évaluer approximativement en additionnant les éclairages issus des différentes sources.

Les graphes présentés à la figure 2 donnent la distribution lumineuse dans un local ouvert de manière latérale, bilatérale ou multilatérale, le 15 juin à 13 heures universelles sous un ciel clair.

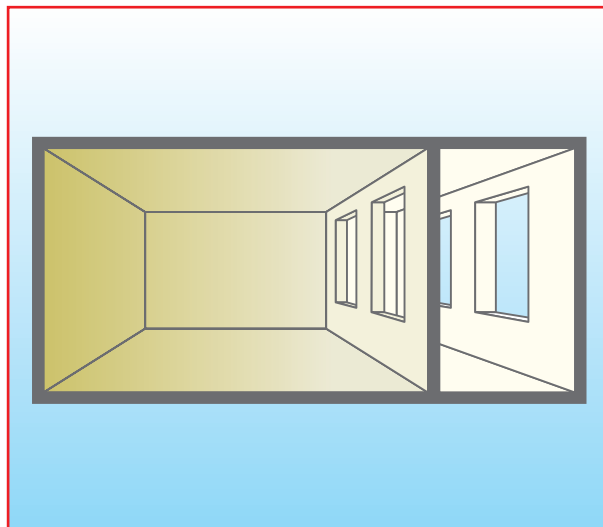
Le second jour

Un local éclairé en second jour est un local qui n'est pas éclairé naturellement par une fenêtre donnant sur l'extérieur mais par l'intermédiaire d'un autre espace, lui-même éclairé naturellement (figure 1).

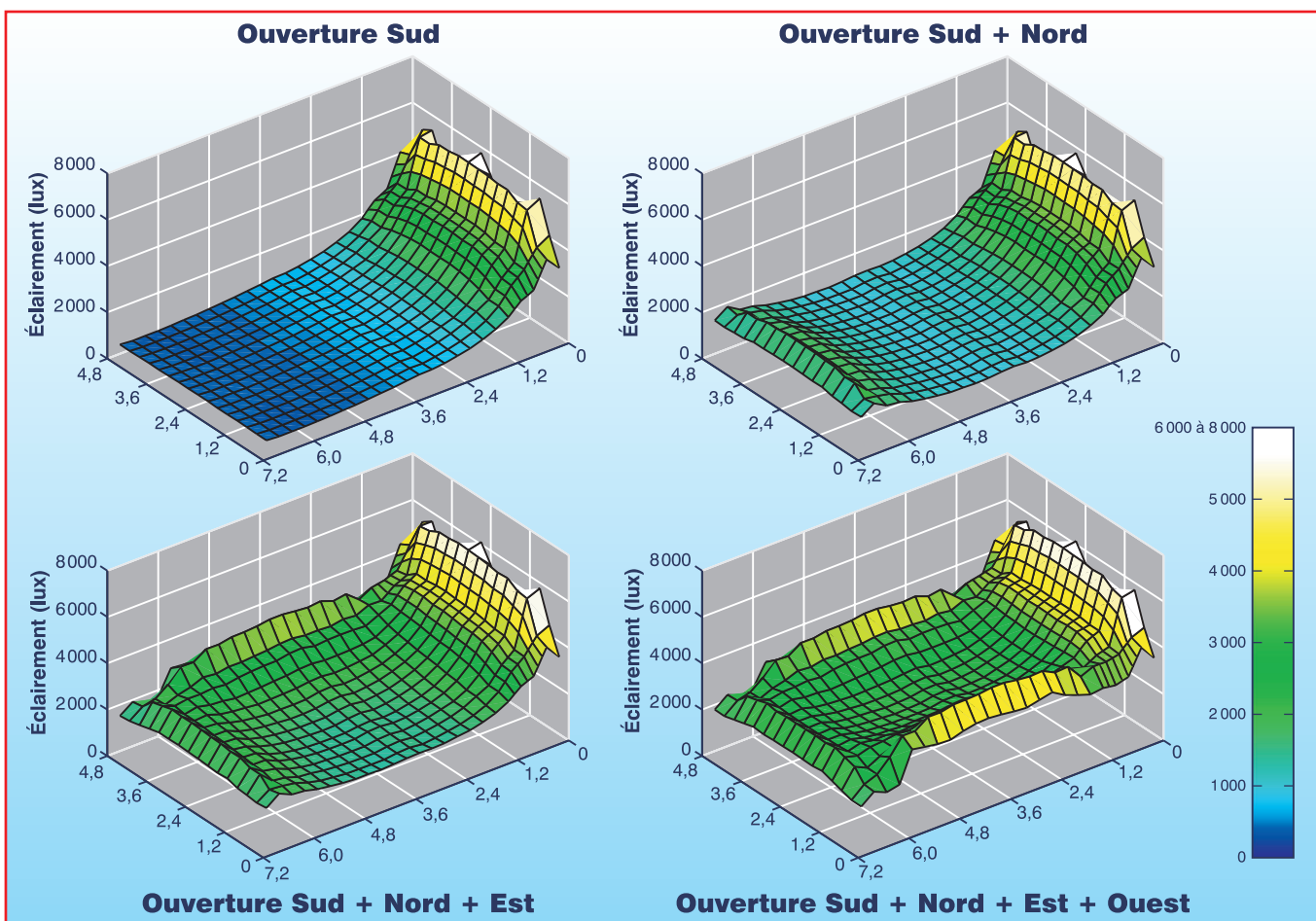
Ce type d'éclairage convient assez bien aux espaces de circulation qui ne demandent que peu d'éclairage (100 lux) et pour lesquels les aspects de contre-jour résultants de fenêtres classiques peuvent s'avérer fort gênants.

L'éclairage fourni en second jour peut être zénithal ou latéral et transmis au travers de parois transparentes ou translucides. Il peut également compléter un éclairage naturel direct pour, par exemple, créer un éclairage bilatéral et améliorer ainsi l'uniformité de l'éclairage du local.

L'éclairage naturel qui parvient dans un espace par une seule des parois verticales est appelé éclairage "unilatéral". Si le local est éclairé par plusieurs ouvertures d'orientations différentes, on dit qu'il s'agit d'un éclairage "multilatéral".



Le second jour. 1



2 Éclairage intérieur en fonction de la répartition des ouvertures.

Les ouvertures zénithales s'ouvrent sur la totalité de la voûte céleste ; elles induisent donc une large pénétration de la lumière diffuse. La distribution lumineuse obtenue par une ouverture horizontale est aussi beaucoup plus homogène que celle produite par une fenêtre verticale. De plus, la lumière entre dans les locaux par le plafond, ce qui limite *a priori* les phénomènes d'éblouissement.

Par contre, par ciel serein, les ouvertures zénithales captent mal les rayons solaires d'hiver alors qu'elles laissent largement pénétrer le soleil d'été, ce qui implique un mauvais comportement thermique.

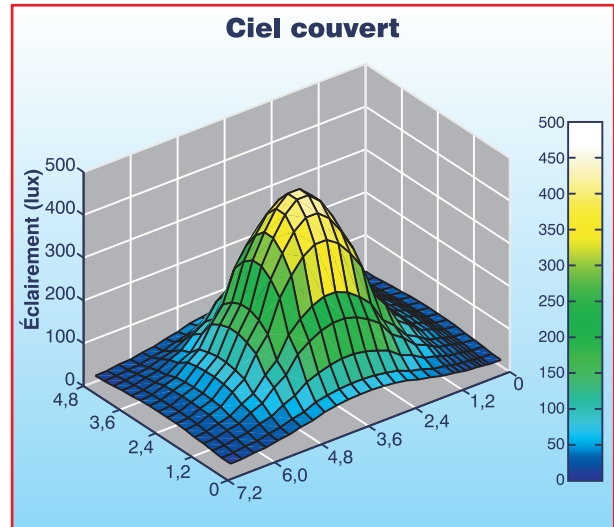
L'éclairage zénithal fournit une distribution de lumière très uniforme ; il contribue à une meilleure répartition de la lumière dans l'espace. La lumière zénithale est cependant défavorable à la perception du relief et les ouvertures zénithales sont d'un entretien plus difficile que les fenêtres latérales. L'éclairage zénithal convient spécialement à la pénétration de la lumière naturelle dans les bâtiments bas et profonds.

Les ouvertures latérales ne voient qu'une partie du ciel. Par ciel couvert, ces ouvertures verticales ont donc des performances lumineuses nettement plus faibles que les ouvertures zénithales. En outre, la lumière pénètre latéralement dans les locaux, ce qui peut créer des situations de contre-jour ou d'éblouissement à proximité des fenêtres.

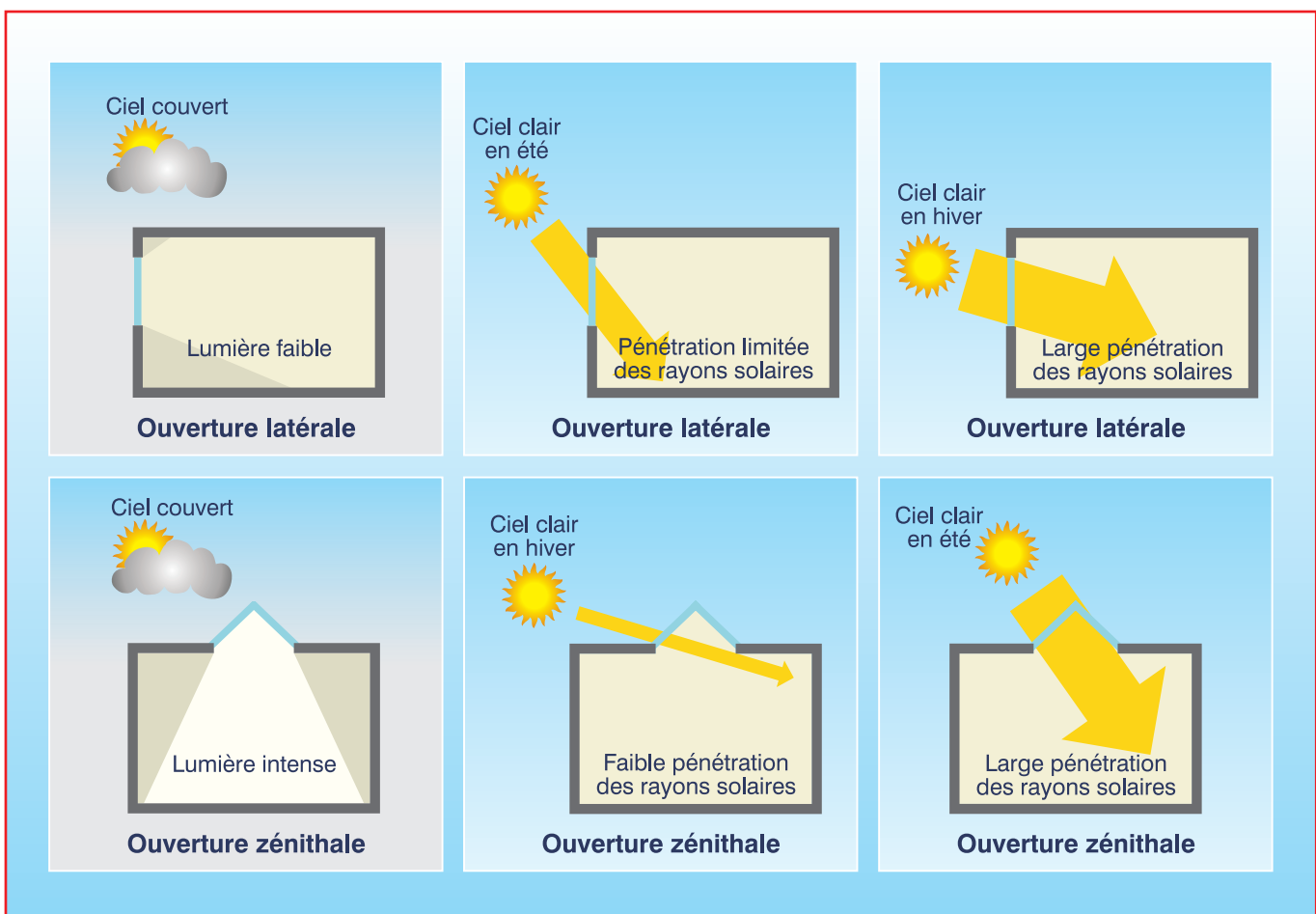
Cependant les fenêtres latérales en façade sud transmettent un maximum de rayons solaires en hiver, ce qui favorise l'utilisation des gains solaires, tout en limitant les pénétrations estivales et les surchauffes qu'elles induisent.

La figure 1 présente les valeurs d'éclairement par ciel couvert d'un local comprenant, pour une seule ouverture, une fenêtre zénithale horizontale de 1,5 m² de surface placée au centre du plafond, le 15 décembre à 13 heures universelles. Cette fenêtre zénithale donne de très bons résultats puisqu'elle procure un éclairage assez uniforme de l'espace, alors que la surface vitrée est faible.

Les fenêtres de façade et les ouvertures zénithales ont un comportement radicalement différent en ce qui concerne les pénétrations solaires.



Éclairage dans un local éclairé zénithalement. **1**



2 Comportement des ouvertures latérales et zénithales.

Une fenêtre en hauteur procure les avantages suivants :

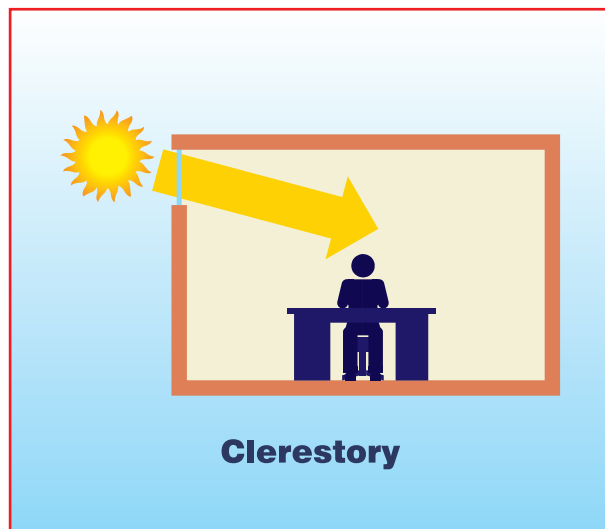
- une répartition plus uniforme de la lumière dans l'espace ainsi qu'un meilleur éclairage du fond du local ;
- une source de lumière au-dessus de la ligne de vision, ce qui réduit les risques d'éblouissement direct ;
- une limitation du risque d'éblouissement par effet de voile pour les tâches particulièrement sensibles à ce problème.

Cependant, un clerestory seul supprime la vue sur l'extérieur. Ainsi, les clerestories ne jouent que faiblement le rôle de lien entre un local et son environnement. En général, il est préférable de coupler un clerestory avec une autre fenêtre, équipée de protections solaires.

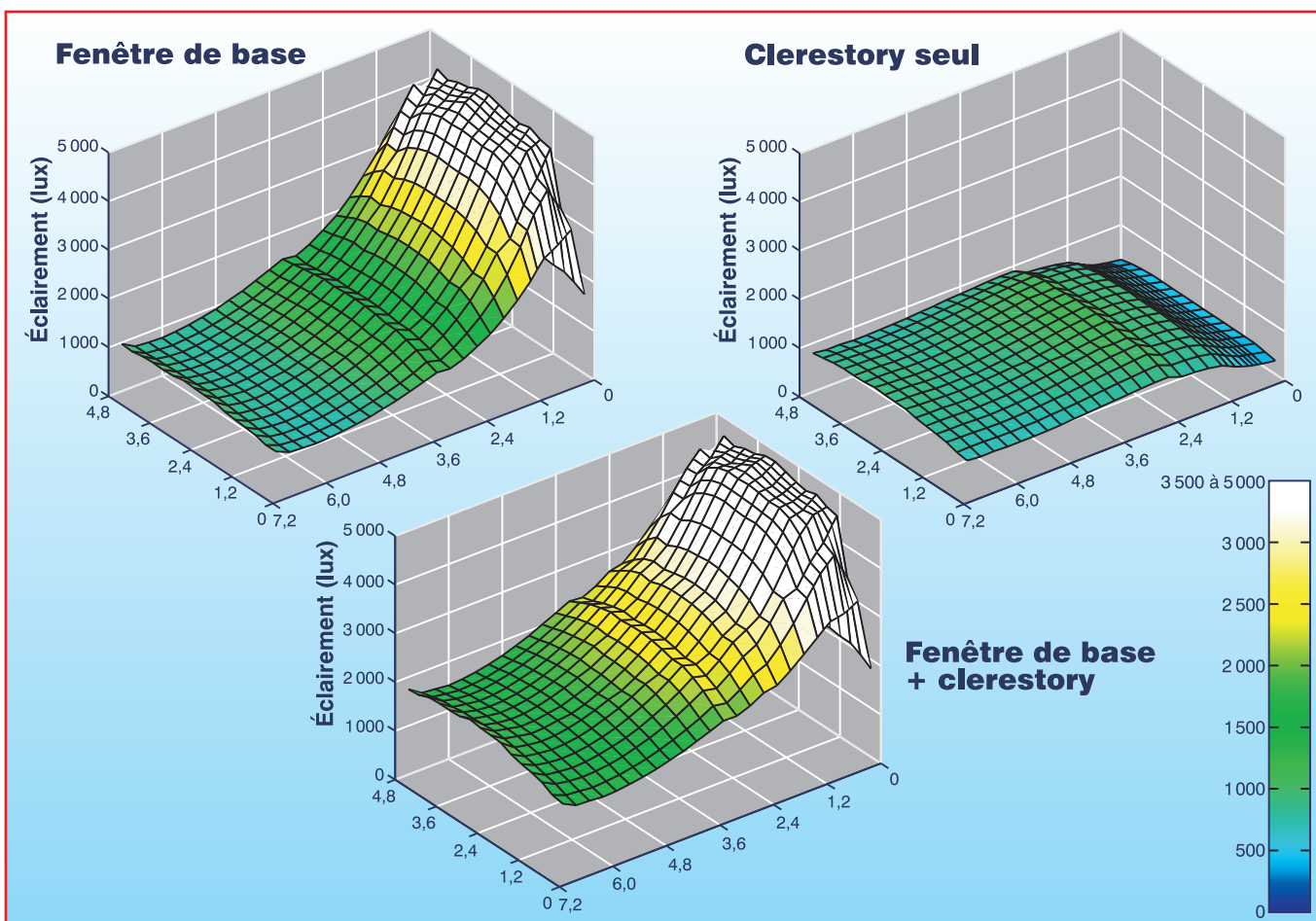
La figure 2 présente le niveau d'éclairement dans un local orienté au sud, le 15 décembre à 13 heures universelles sous ciel clair. La première courbe correspond à une pièce éclairée par un clerestory seul, dont la hauteur vaut 0,75 m et la longueur 4,58 m pour une hauteur d'allège de 2,08 m. Ce vitrage correspond donc à une superficie égale à 10 % de la surface du local. La seconde courbe montre l'éclairage obtenu lorsque le clerestory est placé au-dessus du vitrage classique du module de base, ce qui donne une ouverture équivalente à 25 % de la surface du plancher.

Ces résultats montrent qu'un clerestory éclaire bien le fond du local et fournit un éclairage très uniforme de l'espace, même s'il produit une zone d'ombre à proximité du mur de fenêtre. L'ajout d'une fenêtre sous le clerestory augmente le niveau d'éclairement de la pièce vu que la surface vitrée s'accroît fortement ; la distribution lumineuse dans le local est toutefois moins homogène.

On appelle bandeau lumineux ou "clerestory" toute fenêtre dont le seuil se trouve au-dessus du niveau de l'œil.



Clerestory. 1



2 Impact de l'ajout d'une fenêtre classique à un clerestory.

L'objectif d'un lightshelf est de rediriger la lumière naturelle vers le plafond, en protégeant l'occupant des pénétrations directes du soleil. Il existe diverses variantes de lightselves: horizontales ou inclinées, droites ou incurvées, situées à l'intérieur et/ou à l'extérieur de la fenêtre.

Les principales propriétés d'un lightshelf sont de faire pénétrer la lumière profondément dans la pièce, de réduire les charges de refroidissement en diminuant les gains solaires et d'augmenter le confort visuel. Les lightselves permettent de contrôler la lumière directe du soleil en réduisant l'éblouissement, tout en admettant la lumière du ciel et les rayons solaires réfléchis.

La surface du lightshelf doit être aussi réfléchissante que possible mais peut-être mate, brillante ou spéculaire. Une surface spéculaire renvoie théoriquement plus de lumière mais il faut pour cela qu'elle soit nettoyée très régulièrement. En pratique, un lightshelf brillant (semi spéculaire) est sans doute le meilleur choix. Le maintien de la haute réflectivité des lightselves implique un nettoyage régulier qui n'est pas toujours aisé.

Le plafond est aussi un élément important influençant les performances des lightselves car il joue le rôle de distributeur de la lumière naturelle qui est redirigée vers l'intérieur par le lightshelf. Il est donc important de combiner le lightshelf avec un plafond réfléchissant, de manière à obtenir une bonne efficacité. Les caractéristiques du plafond, importantes au niveau de ce processus, sont sa finition, liée à son degré de spéularité, sa couleur et sa pente. Bien qu'un plafond présentant une surface spéculaire réfléchira plus de lumière dans le local, il faut savoir qu'il augmentera aussi les risques d'éblouissement à proximité du lightshelf. La couleur du plafond doit être aussi claire que possible pour augmenter la réflexion de la lumière dans l'espace. Enfin, la pente du plafond a beaucoup d'importance : un plafond incliné vers le fond du local ou de forme arrondie incurvée vers l'intérieur de l'espace augmentera fortement la profondeur de pénétration de la lumière dans un local.

Les appuis de fenêtre réfléchissants

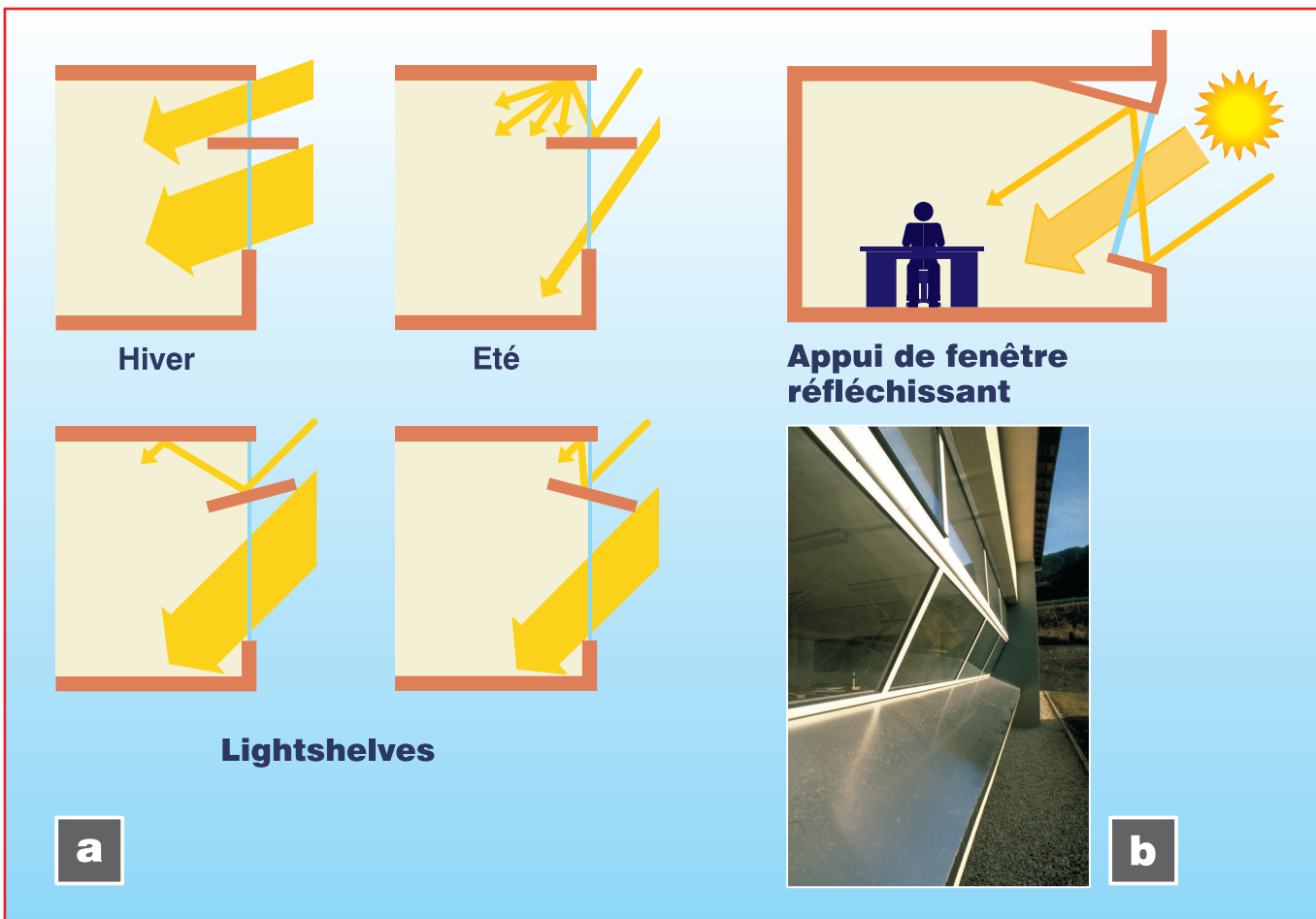
Les appuis de fenêtre réfléchissants (figure 2b) sont en fait une variante d'un lightshelf, placés à hauteur de l'allège de la fenêtre. Ils réfléchissent et redirigent la lumière naturelle pour augmenter le niveau d'éclairage de l'espace intérieur. De nombreux matériaux peuvent être utilisés pour augmenter le facteur de réflexion des seuils de fenêtre, comme des miroirs, de l'aluminium, une surface très polie ou une peinture brillante. Les dimensions de ces surfaces réfléchissantes sont déterminées par la taille de l'ouverture et l'épaisseur du mur mais l'inclinaison du seuil de fenêtre peut être choisie en accord avec la course du soleil.

Il faut toutefois éviter que l'appui de fenêtre réfléchissant ne se trouve dans le champ visuel de l'occupant car un éblouissement gênant peut apparaître lorsque le seuil de la fenêtre est fortement éclairé.

Un "lightshef" est un auvent, dont la surface supérieure est réfléchissante, combiné à un "clerestory", dont le rôle est de permettre la pénétration dans le local du rayonnement solaire réfléchi sur la partie supérieure du "lightshef".



Un lightshelf (arch. Bennets Associates). 1



2 a : Impact d'un lightshelf sur la pénétration solaire en fonction des saisons et de son orientation.
b : Les appuis de fenêtre réfléchissants.

Un atrium au centre d'un bâtiment permet à la lumière du jour de mieux pénétrer dans cet édifice, tout en formant un espace très attrayant. La présence d'un atrium permet également de diminuer les risques d'éblouissement dans les pièces adjacentes. De plus, l'atrium joue le rôle d'espace-tampon entre l'intérieur et l'extérieur, créant un microclimat de qualité pour les hommes et les plantes. Les atria permettent d'apporter au centre d'un édifice l'agrément des conditions extérieures de luminosité, sans leurs désavantages (température, vent...).

L'atrium est une configuration spécialement intéressante pour des bâtiments très larges ou lorsque la densité urbaine est forte puisqu'il offre une lumière latérale aux locaux qui le bordent. Il convient à de multiples applications, comme des galeries, des halls d'hôtels, des centres commerciaux ou des lieux d'exposition.

Les activités qui peuvent prendre place dans cet espace intermédiaire, semi-extérieur, doivent être moins exigeantes en chaleur que celles pratiquées dans le reste de l'édifice. L'atrium est, par contre, très attractif visuellement depuis les différentes parties du bâtiment. Il est donc fréquemment désigné pour représenter les locaux suivants : un hall d'entrée, un espace de circulation, un lieu d'exposition temporaire ou un espace vert de détente.

Paramètres influençant l'efficacité d'un atrium

L'éclairage pénétrant dans l'atrium est réduit par son passage au travers du vitrage ainsi que par la structure porteuse, qui crée un ombrage non négligeable.

Un local adjacent à un atrium est obstrué par la façade opposée de celui-ci. Cette obstruction est d'autant plus importante que le local se situe à un étage inférieur (figure 2a). On peut compenser cette perte de lumière directe en vitrant plus fortement les locaux du bas. Néanmoins, même si on applique cette solution, la partie directe de la lumière naturelle est réduite ce qui fait que la partie réfléchie a un impact de plus en plus important au fur et à mesure que l'on descend d'étage (figure 2b). Les coefficients de réflexion des parois de l'atrium ont donc un rôle important dans l'éclairage des locaux situés en bas.

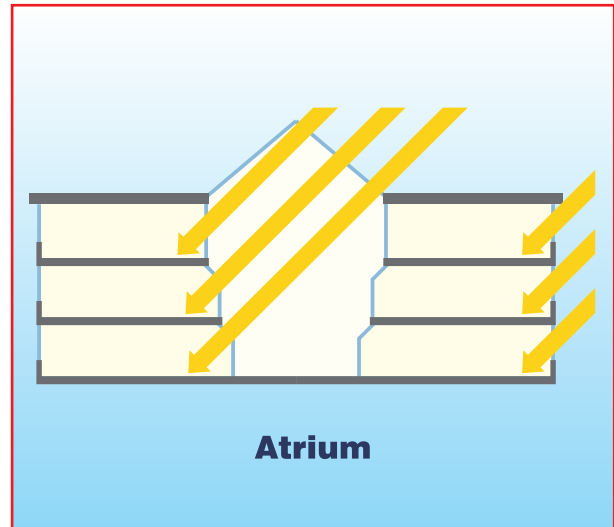
Il existe cependant un paradoxe qui vient du fait que le coefficient de réflexion moyen des parois de l'atrium est fortement réduit lorsqu'on augmente les surfaces vitrées, car celles-ci ont un coefficient de réflexion moyen relativement faible (~15 %). Plus on a de vitrages, plus le coefficient de réflexion lumineuse moyen de l'atrium est faible. Le choix des surfaces vitrées devra donc faire l'objet d'un compromis entre la pénétration de la lumière directe dans le local et l'augmentation de réflexion dans l'atrium.

La partie de la lumière réfléchie par le sol de l'atrium atteindra le plan de travail après une seconde réflexion sur le plafond du local lui-même. Le coefficient de réflexion de celui-ci fait donc partie des points importants à étudier lors de la conception d'un atrium.

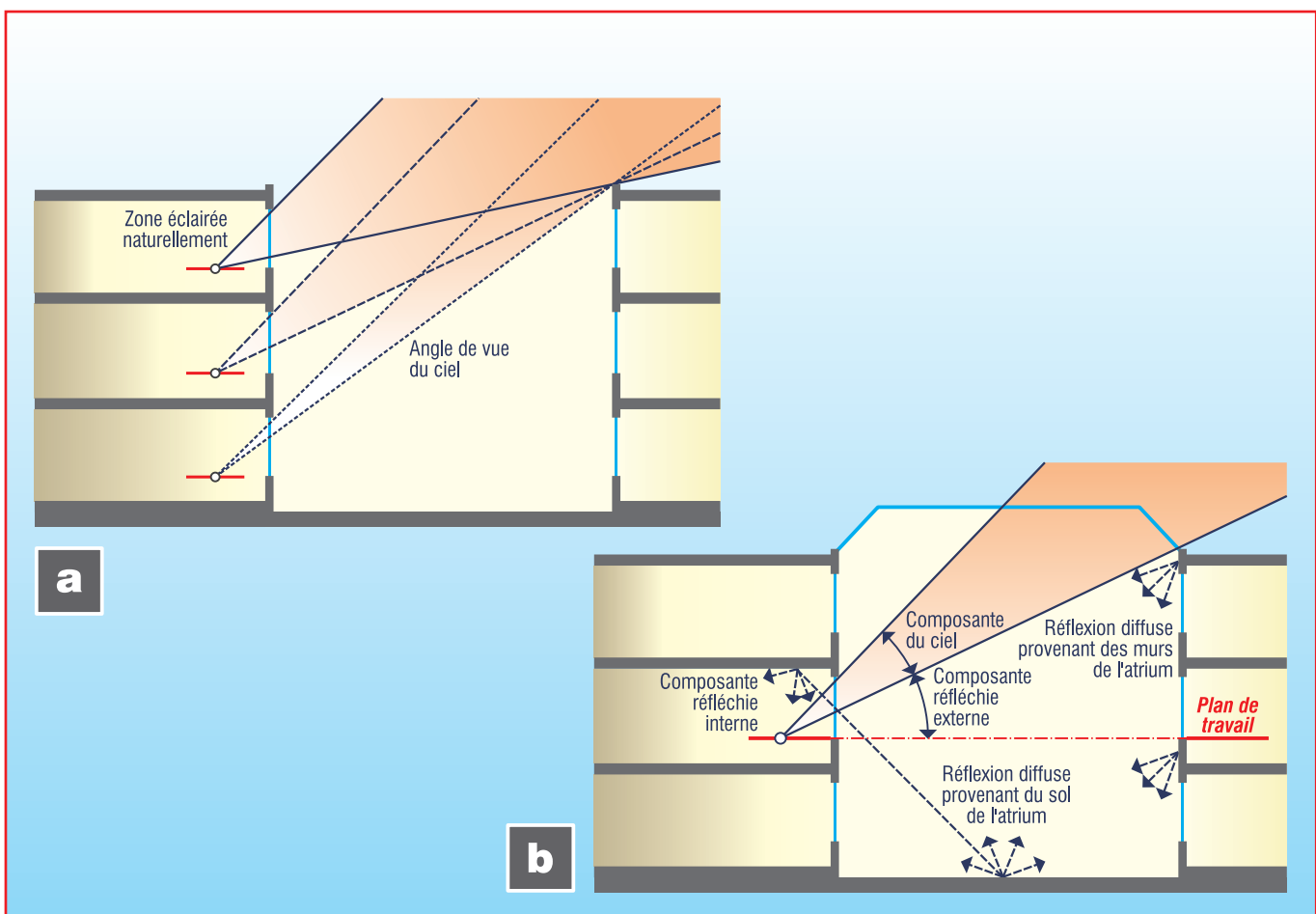
En résumé, les paramètres déterminant le niveau d'éclairage dans les locaux adjacents à l'atrium sont donc :

- le rapport hauteur / largeur de l'atrium ;
- le coefficient de transmission lumineuse du vitrage extérieur de l'atrium ;
- le coefficient de réflexion moyen des murs et du sol de l'atrium ;
- le rapport surface vitrée / surface opaque des murs de l'atrium ;
- le coefficient de transmission et de réflexion lumineuse du vitrage des locaux donnant dans l'atrium ;
- les coefficients de réflexion des murs et plafonds intérieurs des locaux.

Un atrium est un large espace vitré fermé, situé au centre d'un bâtiment ou reliant plusieurs bâtiments entre eux.



Un atrium. 1



2 a : Influence des murs opposés de l'atrium sur l'angle de vue du ciel.
b : L'éclairage de locaux jouxtant un atrium consiste en de la lumière directe combinée à de la lumière réfléchie par les murs et le sol de l'atrium.

Les cours et patios

Les cours et patios n'ont pas de toiture et ne souffrent donc pas de réduction de l'éclairage naturel due à des obstructions et au passage de la lumière au travers d'un vitrage. On dispose de 2 fois plus de lumière naturelle dans des locaux jouxtant une cour que dans des locaux jouxtant un atrium, de mêmes caractéristiques géométriques.

D'un autre côté, il n'existe habituellement pas de structure permettant la mise en place d'un ombrage et il peut en résulter des problèmes d'éblouissement importants à l'intérieur de ce type d'espace, surtout si les matériaux sont de couleurs claires.

Comme les cours ne sont pas protégées, il est habituel de trouver des espaces adjacents au bâtiment, servant de transition entre celui-ci et la partie ouverte. Ces espaces peuvent former des cloîtres ou des vérandas qui protègent de la pluie ou d'un soleil excessif. Ils permettent d'apporter un certain ombrage aux locaux voisins à la cour mais réduisent également de manière significative l'éclairage de ceux-ci.

Cela signifie que si on veut atteindre des niveaux d'éclairage naturel raisonnables, il faudra compter sur la lumière réfléchiée par le sol, en particulier lorsque les murs entourant la cour sont ombragés car ceux-ci ne pourront alors pas jouer comme source de lumière secondaire.

En climat ensoleillé, et là où le sol est de couleur très claire, on peut atteindre de bons résultats d'éclairage, dans des configurations de cloître.

Dans les pays du nord, sous des climats plus couverts, un plus faible éclairage du ciel, combiné avec matériaux de sol souvent plus foncés, font que l'éclairage naturel des locaux adjacents au cloître peut devenir très difficile.

Les galeries

La plupart des commentaires réalisés pour les atria peuvent s'appliquer également aux galeries. Par exemple, l'effet de la couverture vitrée (réduisant l'éclairage direct) ainsi que la dépendance des locaux par rapport à la lumière réfléchiée sur les parois opposées et sur le sol de la galerie, sont comparables pour les atria et les galeries. Cependant, les galeries sont régulièrement utilisées à des fins commerciales ou pour des expositions, ce qui implique des exigences particulières en termes d'éclairage. C'est notamment le cas pour des galeries faisant office de rues intérieures sur lesquelles s'ouvrent des boutiques.

Dans les cas classiques, l'éclairage naturel intérieur des magasins sera environ 10 fois inférieur à celui atteint dans la galerie. Cette différence sera exacerbée par l'usage de matériaux de couleur claire dans la galerie, de manière à augmenter la lumière réfléchiée à l'intérieur de celle-ci. En conséquence, il sera nécessaire d'éclairer artificiellement de manière intensive les objets exposés dans les vitrines, afin d'attirer le regard des passant vers ceux-ci. Les lampes utilisées sont souvent des lampes halogènes peu efficaces (~20 lm/W) qui consomment beaucoup d'énergie et dégagent beaucoup de chaleur.

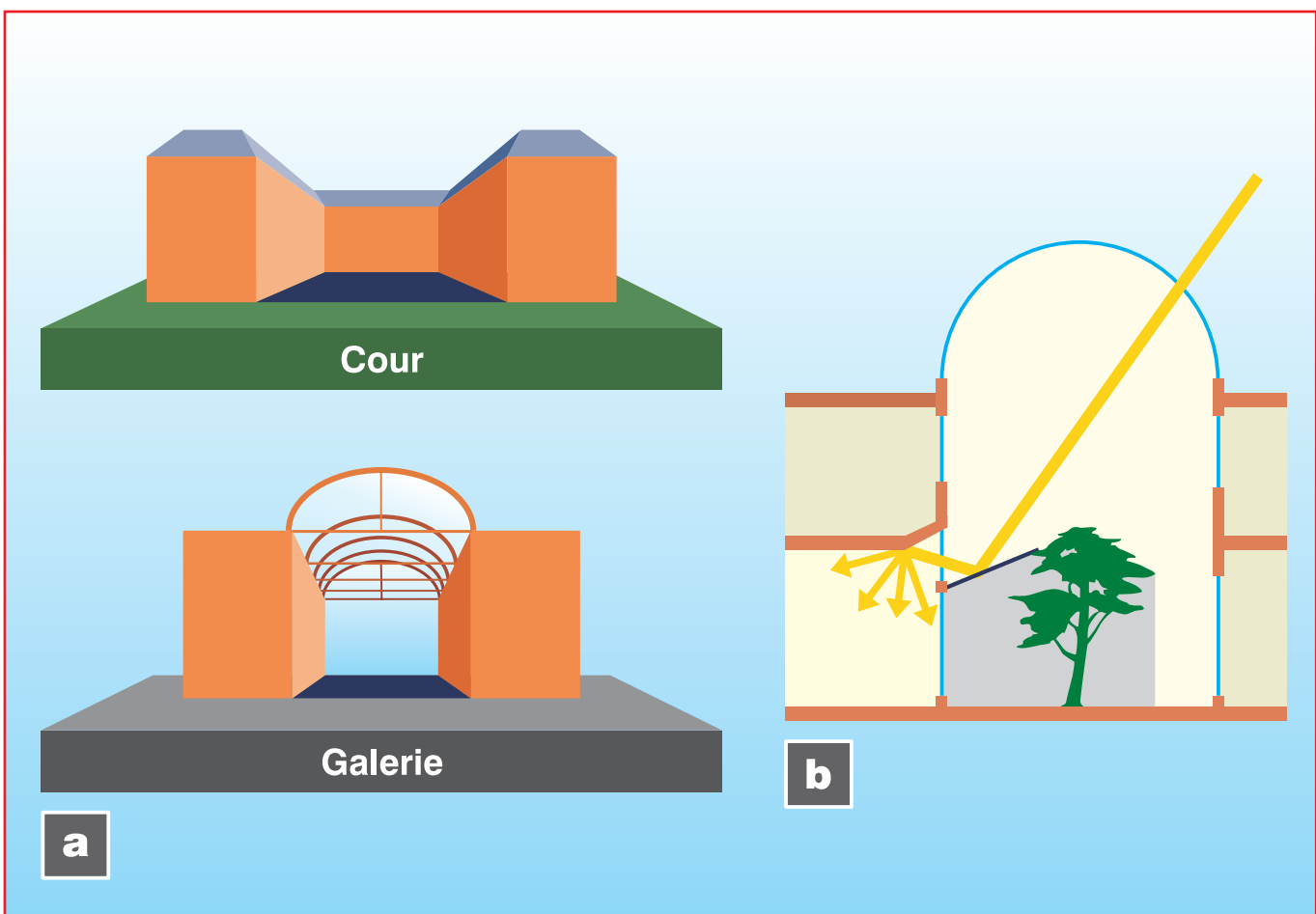
Le cas décrit ci-dessus est pratiquement universel. Il est donc très optimiste de décrire les galeries comme des solutions intéressantes du point de vue de l'éclairage naturel. Cependant il ne convient pas d'abandonner les galeries mais il convient d'approfondir les études d'éclairage naturel dans ce type d'espace afin de trouver des solutions intéressantes, convenant à chaque cas spécifique (voir, par exemple, figure 2b).

Les cours et les patios sont des espaces ouverts non vitrés situés à l'intérieur d'un bâtiment ou adjacent à celui-ci.

Les galeries sont des rues couvertes par des structures fortement vitrées.



Une cour (arch. F. Borromini). 1



2 a : Cour et galerie.
b : Contrôle de la luminance des surfaces éclairées naturellement de manière à optimiser l'éclairage naturel des espaces adjacents.

Certains locaux, placés en position centrale dans un bâtiment, n'ont pas d'accès direct à la lumière du jour. Dès lors, un puits de lumière, passant à travers différentes pièces, permet de répandre la lumière naturelle captée en toiture dans ces locaux aveugles. Un puits de lumière peut aussi donner un supplément de lumière naturelle dans des espaces profonds pour améliorer le niveau d'éclairage des zones les plus éloignées des fenêtres et apporter une distribution lumineuse plus homogène de l'espace. Les puits de lumière sont très souvent utilisés pour éclairer des espaces secondaires comme par exemple les cages d'escalier. Ils leur donnent dès lors un attrait supplémentaire par rapport à leur fonction première de service. Ces éléments deviennent alors des éléments clés de l'architecture.

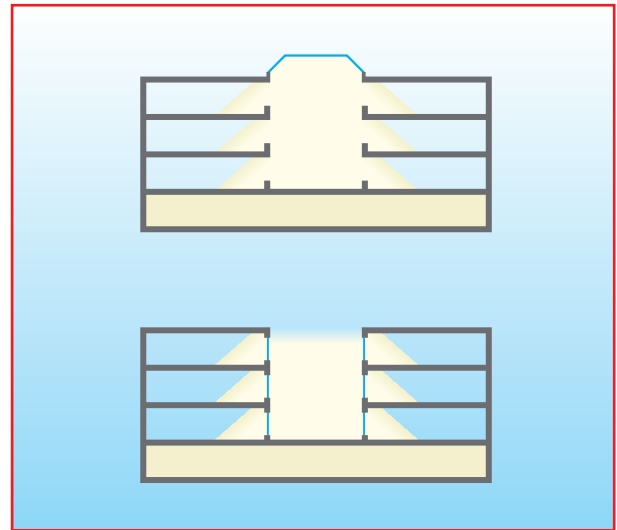
C'est particulièrement vrai dans l'art nouveau et par exemple dans certains bâtiments conçus par l'architecte Victor Horta.

Dans l'hôtel Van Eetvelde, par exemple (figure 2a), les différentes pièces s'articulent autour de ce puits de lumière qui apporte une lumière très intéressante à l'ensemble du bâtiment.

Le magasin Waucquez, situé à Bruxelles, profite également d'un puits de lumière qui, combiné avec des planchers translucides, permet à la lumière de se transmettre sur deux étages (figure 2b).

Le puits de lumière construit à la maison Pléiade (maison bioclimatique belge construite dans le cadre de l'AIE 13) permet également à la lumière naturelle de se répandre sur la hauteur de deux étages pour éclairer le centre de cette maison mitoyenne (figure 2c).

Un puits de lumière est une ouverture située en toiture ou dans le plancher d'un local qui permet d'éclairer naturellement le ou les étages inférieurs.



Les puits de lumière. 1



a



b



c



- 2 a : Hôtel Van Eetvelde à Bruxelles (Belgique) (arch. V. Horta).
b : Magasin Waucquez à Bruxelles (Belgique) (arch. V. Horta).
c : Maison Pléiade à Louvain-la-Neuve (Belgique) (arch. P. Jaspard).

Il existe différentes méthodes de prédétermination de l'éclairage naturel. On peut les classer selon trois catégories principales :

Les modèles simplifiés

Il existe une multitude d'outils simplifiés de prédétermination de la lumière naturelle. Ces outils sont des algorithmes simplifiés, des tables, des nomogrammes, des diagrammes... Ils se présentent sous format papier ou sous forme informatique. Une caractéristique commune de toutes les méthodes de calcul simplifiées est la restriction des paramètres d'entrée à quelques éléments de conception clés.

Ces outils peuvent être très utiles dans la première phase de conception d'un projet. Cependant, ils ne permettent pas d'analyser des situations complexes ni d'étudier une stratégie lumineuse complète. Il est donc très difficile de réaliser une bonne conception de l'éclairage d'un espace en utilisant uniquement ces méthodes.

Les modèles complexes

Les programmes de simulation de l'éclairage naturel ont pris un essor considérable ces 10 dernières années. Ce développement est lié aux progrès importants réalisés dans le domaine informatique.

Les techniques de "lancer de rayon" et de "radiosité" utilisées au départ pour la réalisation de modèles différents semblent assez bien se compléter et il s'avère actuellement que les développeurs s'orientent vers la combinaison de ces deux méthodes dans un même outil.

Les modèles complexes de simulation de l'éclairage naturel (figure 2) permettent de modéliser très précisément les espaces intérieurs et extérieurs. Ils permettent en général l'intégration de calcul d'éclairage artificiel ainsi que la prise en compte de systèmes complexes d'éclairage naturel, comme par exemple les systèmes directionnels. Ils offrent également des impressions visuelles très réalistes. Cependant, ces programmes demandent en général un temps d'apprentissage assez long et un niveau certain d'expertise. Ils sont donc réservés aux personnes spécialisées dans le domaine de l'éclairage naturel. Ils demandent également un temps de calcul relativement long. Ces logiciels requièrent aussi une description détaillée de tous les éléments de l'espace à modéliser et ne sont donc pas applicables au stade de l'esquisse ou de l'avant-projet.

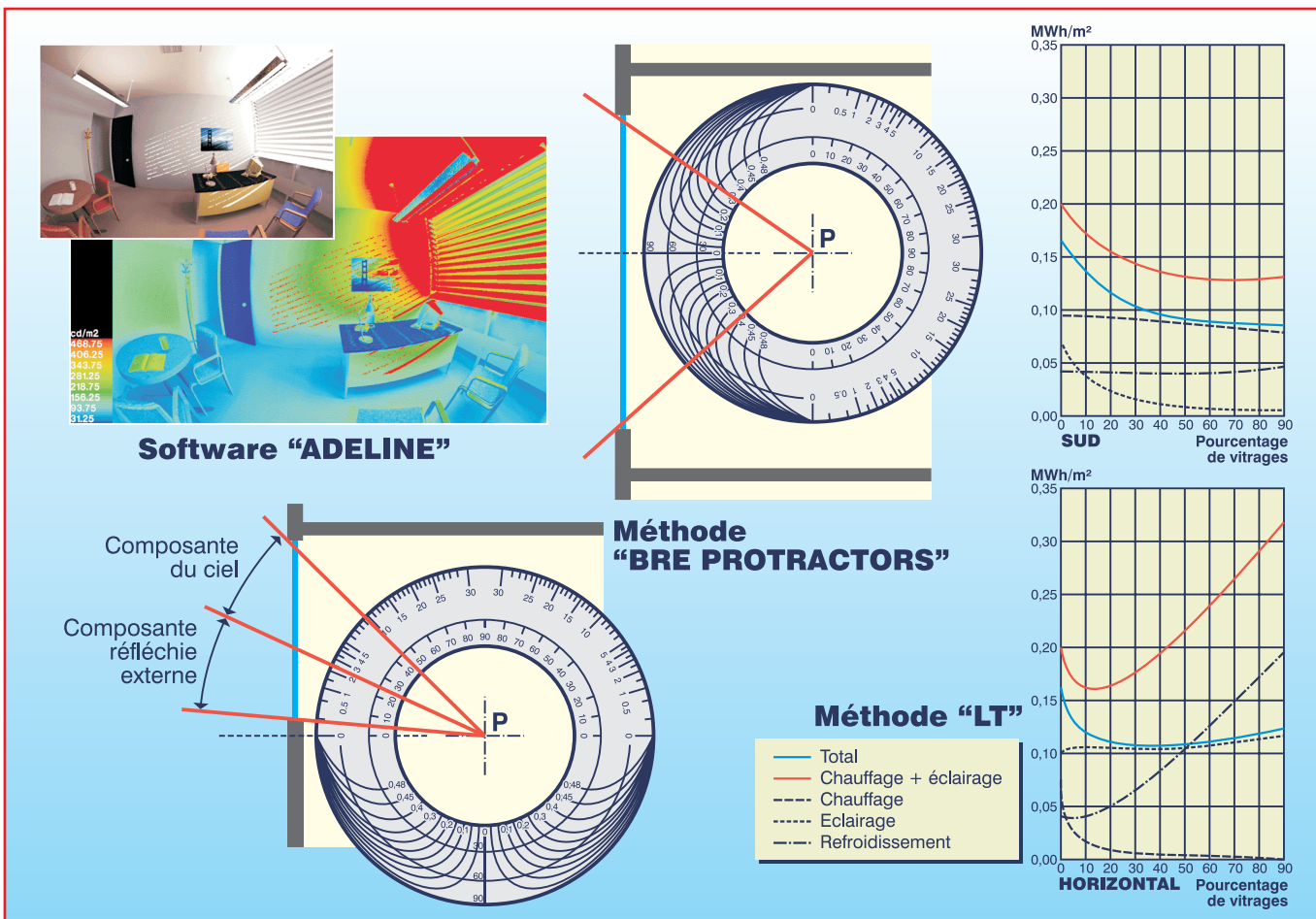
Les modèles réduits

Lorsqu'on construit précisément la maquette d'un local, c'est-à-dire en respectant scrupuleusement sa géométrie ainsi que les caractéristiques de ses parois intérieures (couleur, brillance...) et de son mobilier, on retrouvera la même quantité et qualité de lumière que celle que l'on a dans le local réel (sous des conditions de ciel identiques). L'impression visuelle ainsi que les mesures quantitatives que l'on obtiendra seront très proches, voire identiques, à celles que l'on aurait dans le local réel. Un modèle réduit peut être étudié sous des conditions de ciel réel mais si on désire éviter les problèmes liés à la variation de conditions climatiques, il est plus intéressant de l'étudier sous ciel artificiel. L'utilisation d'un modèle réduit comme outil de conception présente de nombreux avantages qui lui confèrent une attraction particulière pour les architectes.

Les outils d'évaluation de l'éclairage naturel jouent un rôle important dans le processus de conception des ambiances lumineuses en tant que moyens de vérification et d'aide à la décision.



Mesures sous ciel artificiel au CSTC 1 (mirror box).



2 Exemple de différentes méthodes d'évaluation de l'éclairage naturel.

La lumière qui rencontre un vitrage est transmise, absorbée et réfléchi, selon des proportions qui dépendent en grande partie du type de vitrage. Le choix du vitrage influence non seulement la lumière transmise mais aussi les gains solaires et les pertes de chaleur au travers de la fenêtre. La transmission lumineuse et énergétique d'un vitrage peut être caractérisée par trois paramètres : son facteur de transmission lumineuse, son facteur solaire et son coefficient de transmission thermique.

Un simple vitrage clair de 6 mm d'épaisseur a un coefficient de transmission lumineuse de 89 %, un facteur solaire de 82 % et un coefficient U de 5,7 W/m²K. C'est ce faible coefficient U qui poussa les producteurs de vitrage à développer les doubles vitrages à partir de 1965. Actuellement, les problèmes thermiques du bâtiment se situent plus au niveau de la surchauffe, du moins pour les bâtiments du tertiaire. Les derniers développements de vitrages tentent donc de répondre à ce problème en s'orientant vers le développement de vitrages sélectifs, c'est-à-dire de vitrages qui privilégient la transmission d'une partie du spectre solaire, en général la partie visible, tout en réfléchissant le reste du spectre solaire.

Actuellement, il existe trois approches fondamentales permettant d'améliorer les performances énergétiques des vitrages.

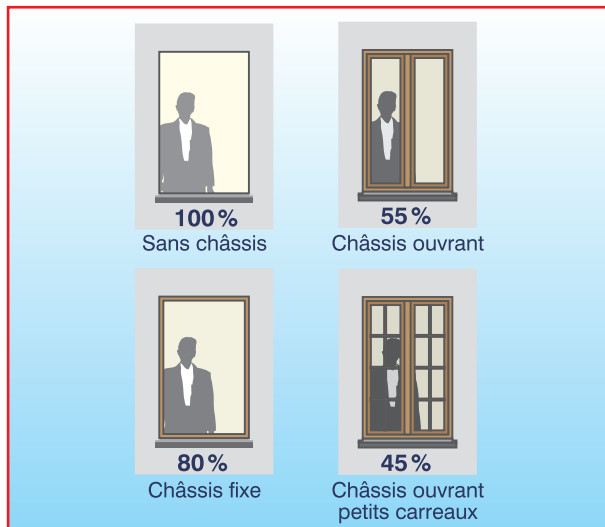
1. Modifier le verre en lui-même en changeant sa composition chimique ou ses caractéristiques physiques. Il s'agit par exemple du verre teinté.
2. Appliquer une couche à la surface du vitrage. Des couches réfléchissantes ou des films ont été développés afin de réduire les gains solaires et l'éblouissement, et plus récemment, des couches à basse émissivité ou sélectives spectralement ont été développées afin de répondre aux conditions spécifiques des climats froids ou chauds.
3. Assembler plusieurs vitrages et contrôler les propriétés de ou des espaces contenus entre ces vitrages.

Modification du coefficient de transmission lumineuse d'un vitrage

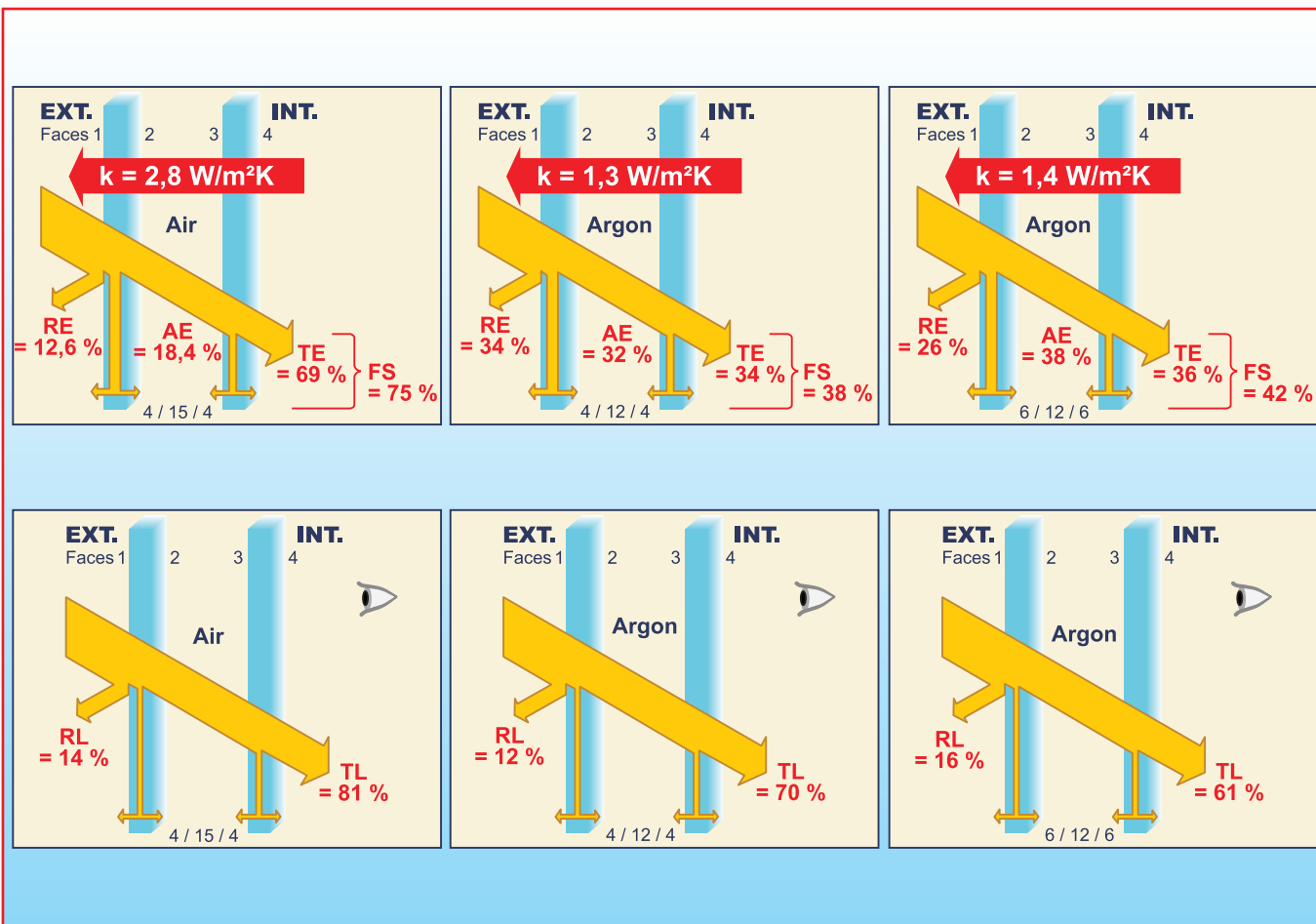
Si un simple vitrage clair de 6 mm a un coefficient de transmission lumineuse de 89 %, la combinaison de deux de ces vitrages en un double vitrage aura un coefficient de transmission lumineuse de $89 \% \times 89 \% = 79 \%$.

Lorsqu'on étudie une fenêtre dans son entièreté, il faut être conscient du fait que la menuiserie atténue très fortement la transmission lumineuse de la fenêtre. La figure 1 donne le pourcentage de surface obstruée par le châssis par rapport à la surface totale de la fenêtre. On constate que la surface de la fenêtre obstruée par un châssis ouvrant est déjà de 45 % et le découpage de la fenêtre en petits carreaux diminue encore la surface vitrée nette de 10 %.

La quantité et la qualité de la lumière naturelle transmise à l'intérieur d'un local par une ouverture dépendent du type de paroi vitrée, de sa rugosité, de son épaisseur, du nombre de couches utilisées et de son état de propreté.



Impact du châssis sur la surface nette de vitrage. **1**



2 Caractéristiques d'un double vitrage classique, d'un double vitrage spectralement sélectif et d'un double vitrage réfléchissant.

Les parois translucides sont des parois au travers desquelles la lumière est transmise de manière diffuse, parfaite ou non. Elles sont utilisées aux endroits pour lesquels une vue directe n'est pas souhaitée (par exemple, pour une salle de bain) ou pour se protéger du rayonnement direct du soleil. Elles peuvent également être intéressantes pour des clerestories ou des ouvertures zénithales, dont le but n'est pas la vue.

Les verres imprimés, dépolis ou sablés sont des verres translucides. Il est également intéressant d'utiliser des dalles de plancher en verre translucide lors de la création de puits de lumière. Les briques en verres peuvent aussi être diffusantes et existent même en différentes couleurs, pour créer des effets décoratifs.

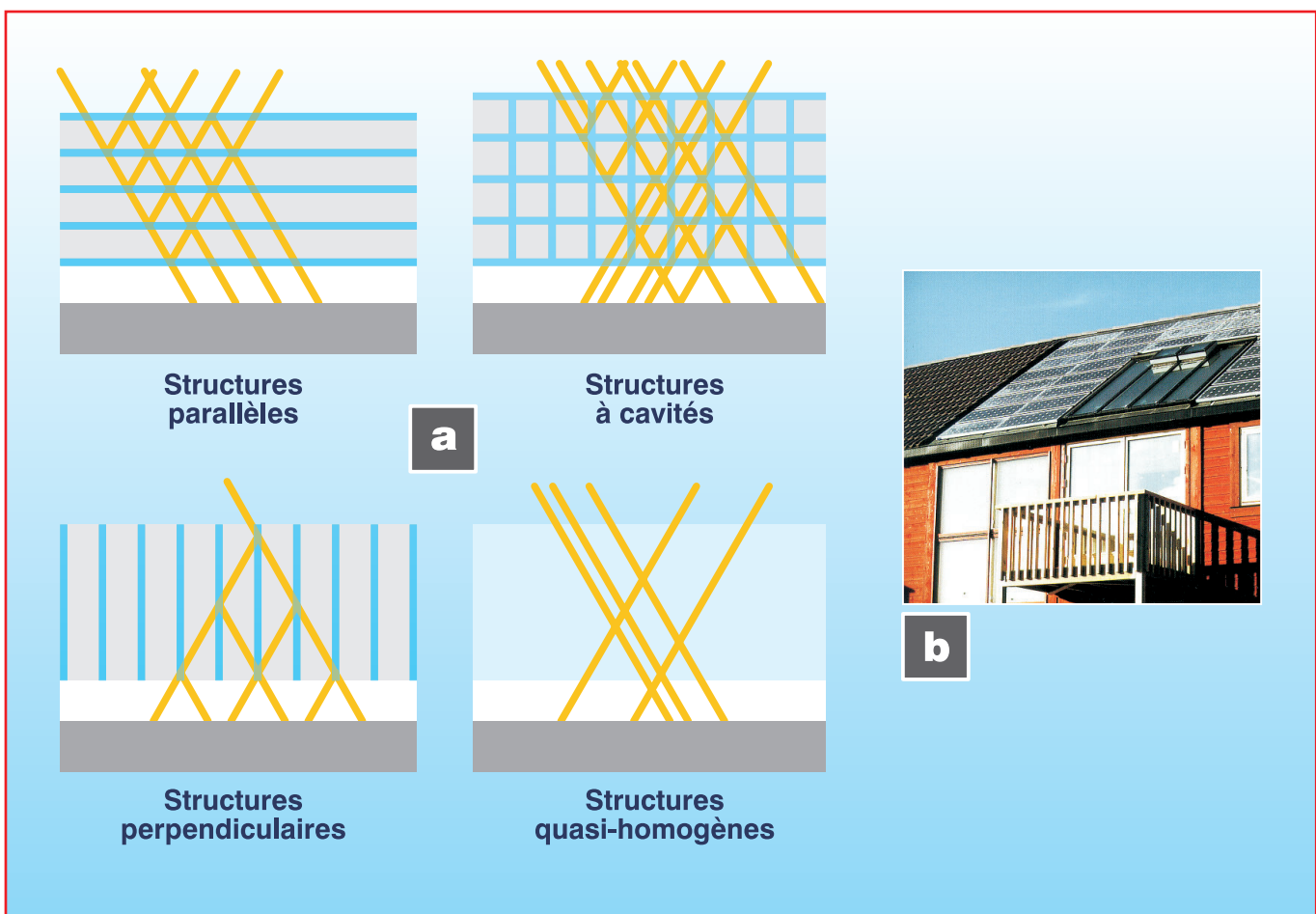
L'isolation transparente

L'isolation transparente est un matériau ayant une grande isolation thermique et un facteur solaire élevé. Techniquement parlant, même si le matériau est qualifié comme transparent, il est en fait translucide. Les matériaux d'isolation transparente sont classés en fonction de leur structure géométrique. Il en existe quatre types principaux. Il s'agit des structures parallèles, perpendiculaires, à cavités et quasi-homogènes (figure 2a). L'isolation transparente est utilisée pour les fenêtres ou les murs exposés directement au rayonnement solaire (figure 2b) ou comme isolation pour les absorbeurs placés dans les panneaux solaires. L'isolation transparente peut être utilisée à la place d'un vitrage, dans un mur trombe. Elle peut aussi être placée sur des murs extérieurs isolés, en laissant un espace entre le mur et l'isolation transparente. L'air chaud de la cavité peut ainsi être utilisé pour ventiler le bâtiment.

**Les parois translucides
permettent la pénétration
de la lumière tout en
coupant la vue directe
au travers de cette paroi.**



Exemple d'utilisation de matériaux **1**
translucides.



2 a : Les différents types d'isolation transparente.
b : Exemple d'application de l'isolation transparente.

Les vitrages teintés ou absorbants

Un vitrage teinté est un vitrage auquel on a ajouté un additif chimique qui modifie sa couleur et par conséquent ses propriétés physiques. Il est spécialement étudié pour maximiser l'absorption de tout ou d'une partie du spectre solaire.

L'utilisation d'un vitrage teinté change l'apparence de la fenêtre et peut augmenter l'intimité dans un bâtiment, durant la journée. Cependant cet effet est inversé durant la nuit, rendant la vue de l'intérieur vers l'extérieur plus difficile. Les vitrages teintés gardent leur transparence depuis l'intérieur. Les couleurs les plus communes sont le gris neutre, le bronze, et le bleu-vert, qui n'affectent pas trop les couleurs perçues au travers de ceux-ci et tendent à s'accorder avec les autres couleurs couramment utilisées en architecture.

Il existe deux catégories de vitrages teintés : le vitrage teinté traditionnel qui diminue la lumière aussi bien que les gains solaires et le vitrage sélectif, qui réduit les gains solaires mais permet à plus de lumière de pénétrer à l'intérieur que le vitrage teinté traditionnel. Ces vitrages, qui sont de couleur bleue claire ou verte, ont un coefficient de transmission lumineuse plus élevé que les vitrages teintés traditionnels de couleur bronze ou grise, mais un facteur solaire moins élevé que ces derniers. Les vitrages teintés permettent donc de diminuer le facteur solaire mais en conséquence, le coefficient de transmission lumineuse descend très fort. Les vitrages teintés ne permettent pas non plus de diminuer le facteur solaire en dessous d'une certaine limite.

Les vitrages réfléchissants

Si on désire un facteur solaire plus faible que cette limite atteinte par l'utilisation d'un vitrage teinté, on peut appliquer une couche réfléchissante sur le vitrage, ce qui augmente le coefficient de réflexion de celui-ci.

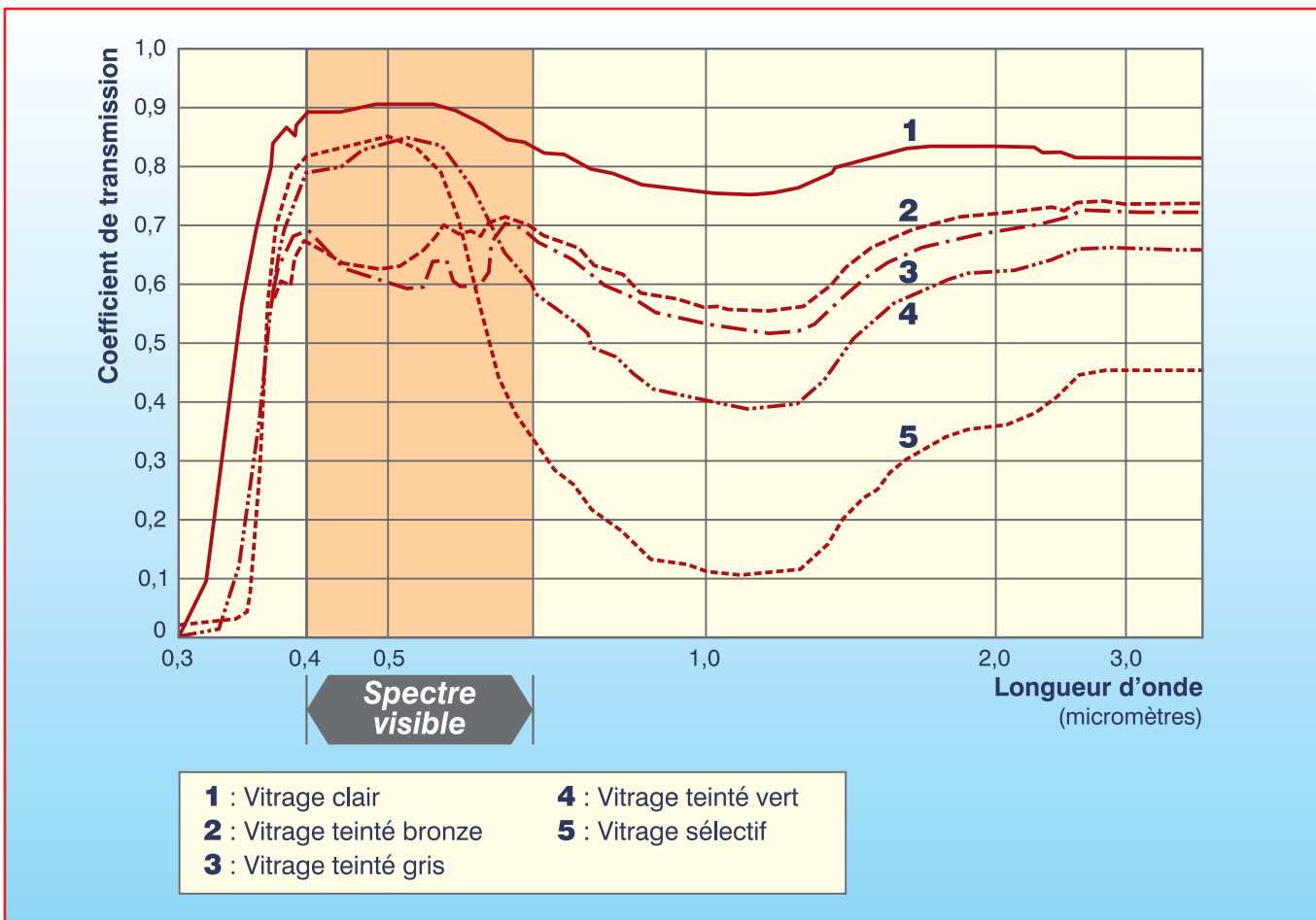
En général, ces couches consistent en de très fines couches métalliques qui existent en différentes couleurs (argent, or et bronze) et qui peuvent être appliquées sur un vitrage clair ou teinté. Le facteur solaire du vitrage peut être diminué un peu ou très fort, en fonction de l'épaisseur et du coefficient de réflexion de la couche et de sa position dans la fenêtre.

Lorsqu'on décide d'utiliser un vitrage réfléchissant il faut être conscient que la lumière réagira sur celui-ci comme sur un miroir et qu'il pourra en résulter des problèmes d'éblouissement qui pourraient gêner les piétons ou les automobilistes ou encore les personnes présentes dans les bâtiments voisins. De plus, il est important de rappeler qu'un vitrage réfléchissant joue le rôle d'un miroir, pour la face qui est exposée à la lumière. Il produira donc un effet de miroir depuis l'extérieur durant la journée, mais ce rôle de miroir sera inversé et apparaîtra depuis l'intérieur du bâtiment durant la nuit, rendant difficile la vision vers l'extérieur.

Les caractéristiques physiques d'un vitrage peuvent être modifiées en le teintant ou en le recouvrant d'une couche réfléchissante une partie ou l'entièreté du spectre solaire.



Les vitrages réfléchissants agissent **1** comme des miroirs en renvoyant l'image des bâtiments voisins.



2 Courbe spectrale de transmission lumineuse de divers vitrages teintés.

1. La limitation de l'éblouissement

Les problèmes d'éblouissement sont très importants lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin pour les fenêtres orientées à l'est, le soir pour l'orientation ouest, ou encore au sud en hiver. Sous nos latitudes, il ne faut pas négliger le problème de la protection des ouvertures situées au nord. En effet, en plein été, le soleil qui se lève au nord-est et se couche au nord-ouest peut provoquer des problèmes d'éblouissement en début et en fin de journée au travers de ces ouvertures. De plus, la vision directe d'un ciel trop lumineux peut être gênante quelle que soit l'orientation de la baie.

Il est important de distinguer si la cause principale d'éblouissement est le rayonnement solaire direct ou uniquement le rayonnement diffus. Pour arrêter le rayonnement solaire direct, des protections solaires opaques ou pratiquement opaques sont indispensables. Les matériaux translucides comme les verres teintés, les fins stores déroulables de couleur claire ou les rideaux minces peuvent devenir des sources lumineuses secondaires et créer de l'éblouissement sous un rayonnement solaire direct, alors qu'ils sont suffisants pour supprimer l'éblouissement dû au ciel.

2. La diminution des surchauffes

Le placement de bonnes protections solaires peut, dans certains cas, supprimer la nécessité d'une installation de climatisation ou, tout au moins, en diminuer son utilisation, ce qui entraîne toujours des conséquences positives au niveau des économies d'énergie et de l'environnement.

3. La suppression de l'insolation directe

L'augmentation de la température ambiante d'un local n'est pas la seule source d'inconfort thermique pour les occupants. En effet, malgré une température ambiante supportable, le rayonnement chaud du vitrage et le rayonnement direct du soleil sur une partie du corps peuvent devenir rapidement insupportables pour les occupants. Il faut donc pouvoir supprimer l'insolation directe.

4. Augmenter le pouvoir isolant de la fenêtre

L'utilisation de protections solaires modifie de façon plus ou moins sensible les caractéristiques de transmission thermique des fenêtres. Certaines protections intérieures ou insérées dans le double vitrage peuvent réduire leurs déperditions thermiques de 25 à 40 %.

5. Assurer l'intimité des occupants ou occulter un local

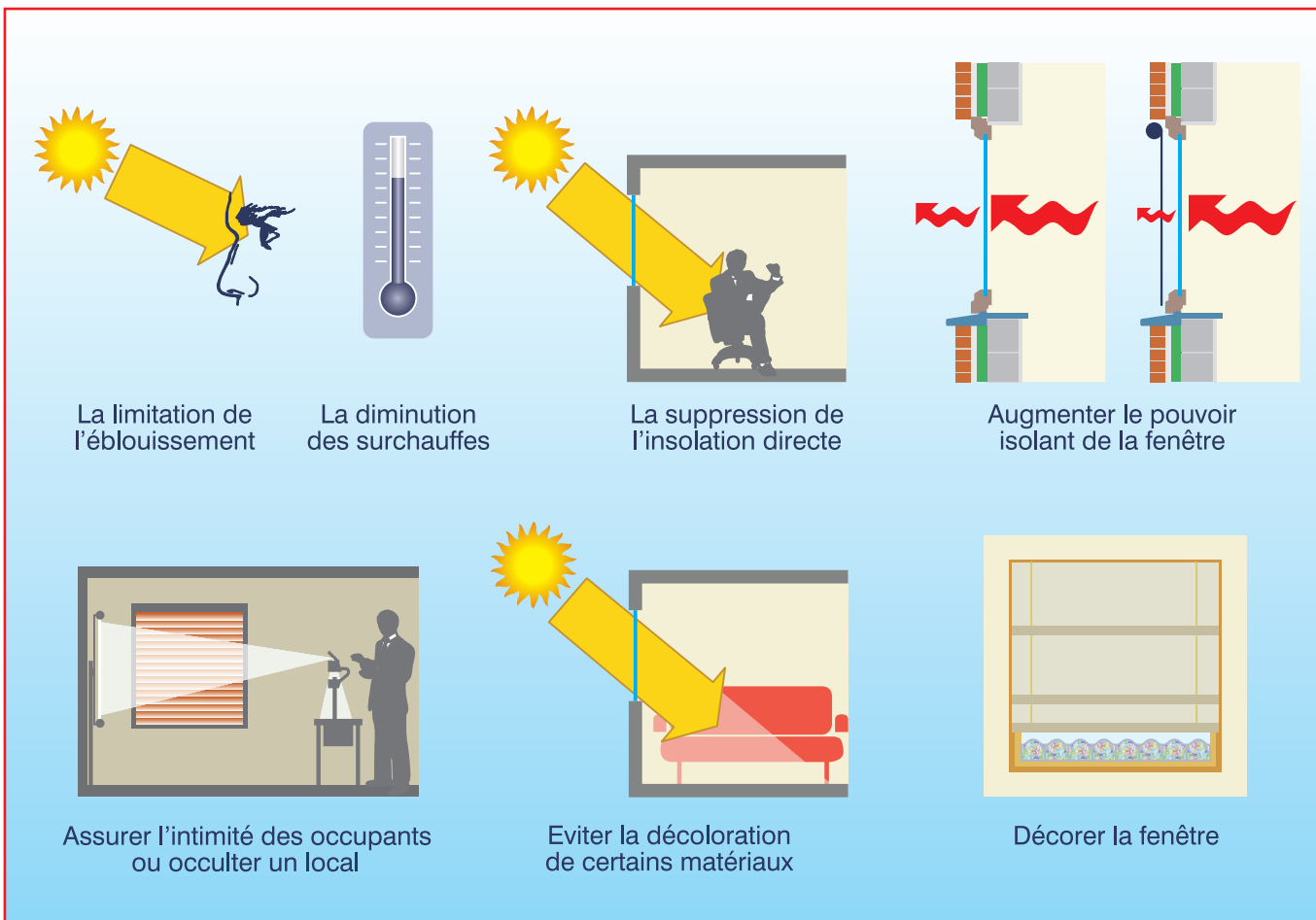
6. Éviter la décoloration de certains matériaux

7. Décorer la fenêtre.

Les protections solaires permettent d'atteindre différents objectifs en fonction des situations rencontrées. Le choix du type de protection dépendra, dès lors, de l'importance que l'utilisateur donnera à chacun d'eux en fonction de ses besoins.



Exemple d'une protection solaire intérieure. **1**



2 Les objectifs d'une protection solaire.

Le type de protection solaire idéal à mettre en place pour un projet particulier dépend de nombreux facteurs tels que la latitude du site considéré, l'orientation des baies vitrées, le type de contact désiré avec l'extérieur ou le mode d'occupation du local à protéger. D'autres critères peuvent s'ajouter pour influencer le choix de la protection tels que sa résistance mécanique, sa maintenance, son coût ou la possibilité d'ouvrir les fenêtres pour créer une ventilation naturelle du bâtiment.

L'emplacement des protections solaires

Qu'elle soit intérieure, extérieure ou intégrée au vitrage, une même protection solaire permettra un contrôle identique de la luminosité ; par contre, elle sera toujours plus efficace dans la lutte contre les surchauffes si elle est placée à l'extérieur du vitrage. Le choix de la position de la protection solaire relève donc surtout de considérations d'ordre thermique, de maintenance et des aspects esthétiques.

Le grand avantage des protections extérieures réside dans le fait qu'elles rejettent le rayonnement solaire avant qu'il n'ait atteint le vitrage.

Une protection solaire est efficace contre les surchauffes dans les cas suivants :

- si elle est extérieure. Dans ce cas, elle arrête les rayons du soleil avant qu'ils n'atteignent le vitrage ;
- lorsqu'elle est intérieure, si elle repousse les rayons du soleil ayant traversé le vitrage. Pour cela, elle doit être non absorbante et très réfléchissante.

Les protections extérieures présentent toutefois trois contraintes qui sont un encombrement plus important, l'obligation de résister aux intempéries, et une plus grande difficulté à les nettoyer et à les entretenir.

La mobilité des protections solaires

Les protections permanentes présentent un système fixe dont le degré de protection est constant quelle que soit l'heure ou la saison. Citons comme exemples les films collés contre les vitrages ou les vitres spéciales.

Les protections fixes sont identiques quelles que soient l'heure et la saison mais ont un degré de protection variable en fonction de la position du soleil.

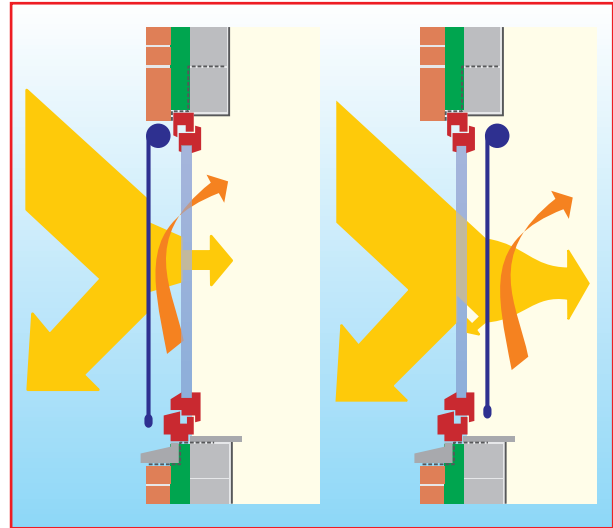
Les protections mobiles peuvent être adaptées en fonction de la position du soleil ou des souhaits des occupants. L'emploi d'écrans mobiles permet donc une meilleure adaptation de la protection aux besoins réels des utilisateurs.

Les apports solaires peuvent donc être modulés par le retrait partiel ou complet de la protection ou par l'inclinaison de ses lamelles. Cette modulation peut être gérée par l'occupant de façon manuelle, motorisée (par télécommande) ou automatique (grâce à un régulateur).

Le principal inconvénient d'une protection mobile est lié à la gestion de la manipulation de la protection. En effet, une protection non automatisée ne sera jamais employée de manière optimale et peut même nuire aux objectifs de confort visuel et d'économies d'énergie. Dans le cas d'une protection automatisée, il faut tenir compte de la liberté de l'occupant de mettre en dérogation le système.

Un autre désavantage de ce système est l'encombrement du mécanisme escamotable de la protection, qui peut diminuer de façon non négligeable la surface utile de la fenêtre.

Les deux grandes classifications des protections solaires sont basées sur leur position par rapport au vitrage et leur mobilité.

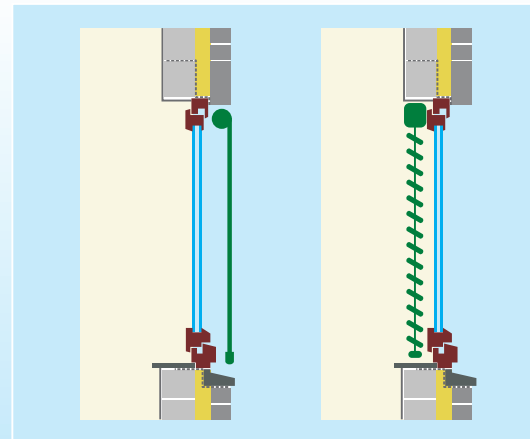


Comportement d'une protection solaire **1** par rapport à la chaleur, selon sa position.

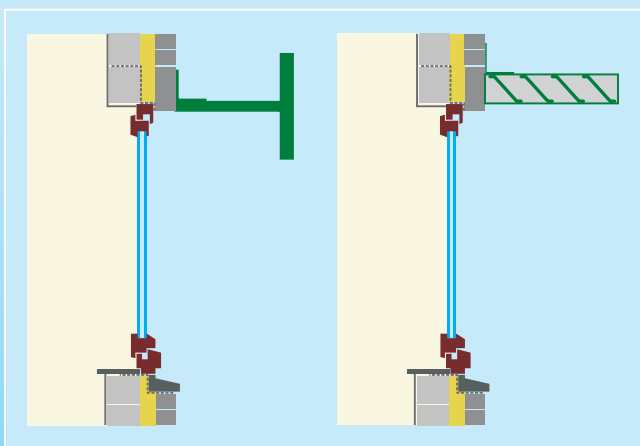


Arch.: M. Van der Rohe

a



b



2 a : Protection fixe.
b : Protection mobile.

Les protections liées à l'environnement (figure 1)

La végétation peut effectivement servir à réduire l'exposition d'une fenêtre au soleil. Les plantations doivent être choisies soigneusement en prenant en compte leur taille et leur type, ce choix influençant la forme de l'ombre qu'elles produisent en été comme en hiver.

Les constructions forment des écrans fixes pour le voisinage. Leur rôle peut être positif si l'on cherche une protection contre le soleil : c'est le cas des villes méditerranéennes traditionnelles où l'é étroitesse des ruelles et la hauteur des bâtiments réduisent considérablement le rayonnement direct et fournissent un ombrage bienvenu.

Les éléments architecturaux

La forme du bâtiment peut produire un ombrage sur certaines de ses parois. De nombreux éléments de façade participant à la définition architecturale du bâtiment constituent des éléments d'ombrage. Citons les surplombs de toiture, les débordements latéraux, les encorbellements, les balcons et les arcades.

Les protections ajoutées

Parmi ceux-ci citons les lighshelves qui, en plus de protéger le bâtiment, réfléchissent la lumière vers le fond du local (figure 2a).

Le brise-soleil est, lui, formé de lames disposées sur un châssis (figure 2b). Son efficacité dépendra de l'orientation de ses lamelles ainsi que de l'espacement entre celles-ci.

La jalousie est un élément extérieur ou intérieur composé d'écrans en lamelles placées devant la totalité de l'ouverture (figure 2c). Elle contrôle la lumière directe du soleil, tout en laissant passer la lumière de manière indirecte. Une jalousie permet la ventilation naturelle et garantit l'intimité d'un local.

Les stores vénitiens sont composés de lamelles qui sont mobiles grâce à un système de câbles ou de chaînes (figure 2d). La protection dépend de l'orientation donnée aux lamelles. La modulation de la protection solaire en fonction des besoins est la propriété principale des stores à lames orientables. Cette adaptation peut se faire tant par retrait que par inclinaison des lamelles.

Une persienne est formée d'une série de lamelles extérieures, fixes ou mobiles, placées dans le plan de la façade (figure 2e).

Les stores enroulables sont composés d'une toile qui se déploie devant la fenêtre (figure 2f). La protection est complètement amovible : le store peut être abaissé ou relevé, partiellement ou entièrement, en fonction des besoins en apports solaires.

Les marquises, faites d'éléments flexibles et ajustables, opaques ou diffusants, ombrent le vitrage tout en laissant une vue possible vers l'extérieur (figure 2g).

Les stores projetés à l'italienne combinent les propriétés des protections enroulables verticales et des protections horizontales (figure 2h). Ils permettent de conserver un certain apport d'éclairage naturel.

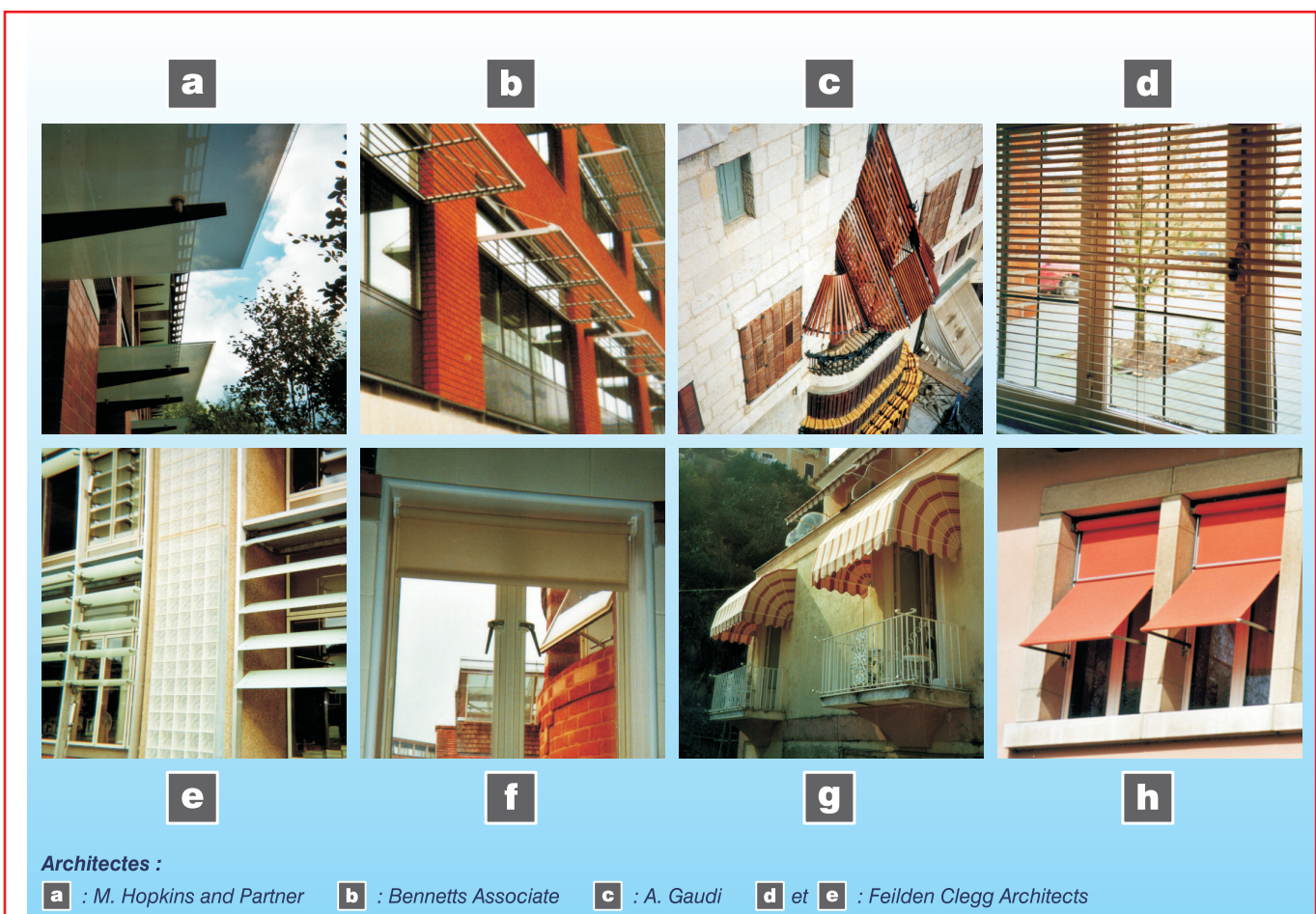
Les vitrages protecteurs

L'emploi de vitrages absorbants et de vitrages réfléchissants constitue un moyen de réduire la transmission solaire de manière constante au cours de l'année. Les vitrages spéciaux peuvent offrir une solution lorsque les systèmes d'écrans permanents ou mobiles sont indésirables ou difficiles à réaliser.

Il existe différents types de protections solaires : les protections liées à l'environnement, les éléments architecturaux, les protections ajoutées ainsi que les vitrages protecteurs.



Protections solaires liées à l'environnement. 1



Architectes :

a : M. Hopkins and Partner

b : Bennetts Associate

c : A. Gaudi

d et **e** : Feilden Clegg Architects

2 Les différents types de protections solaires.

Un conduit solaire, également appelé lumiduc, est composé de trois éléments : un collecteur extérieur (système réfléchissant la lumière à l'intérieur du conduit), généralement localisé sur le toit, un système de conduit de lumière qui dirige les rayons lumineux dans le bâtiment et finalement, un luminaire qui distribue la lumière dans l'espace intérieur.

Comme la lumière directe du soleil est une source de très grande luminance, la lumière qui tombe sur un collecteur d'une surface de 1 m² aux alentours de midi a le potentiel d'apporter un éclairage de 300 lux sur une surface intérieure d'environ 65 m² (en considérant un facteur total de rendement du conduit de 20 %, ce qui est très réaliste puisqu'on peut arriver, pour des très bon systèmes, à une valeur de 25 %). De plus, vu la grande efficacité lumineuse de l'éclairage direct, l'éclairage qui est obtenu est source de peu de charges internes.

Cependant, on rencontre actuellement encore peu de systèmes de ce type dans les pays européens, car il s'agit d'une technologie chère qui requiert un entretien complet et régulier, de manière à préserver son efficacité. De plus, les performances des conduits lumineux par rapport à la lumière diffuse sont très faibles. Ce dernier point restreint fortement le développement des conduits lumineux dans les pays dont le climat présente une forte prédominance de ciels couverts.

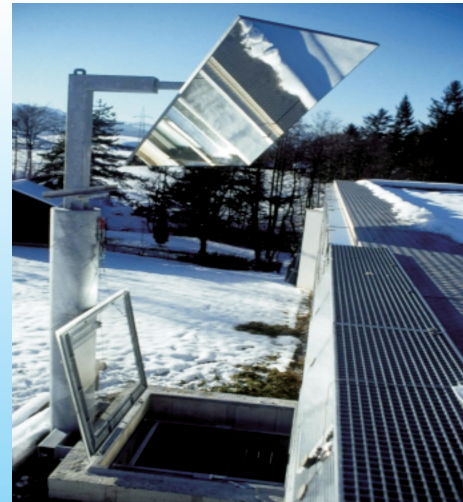
Le collecteur extérieur est mobile ou possède une partie mobile, contrôlée en fonction de la position du soleil. Son objectif est de rediriger les rayonnements solaires directs vers un récepteur fixe. Le collecteur peut être un miroir, souvent concave, une lentille de Fresnel ou un système formé de deux miroirs plans. Le récepteur peut être un autre miroir ou aussi une lentille. Son but est de produire un faisceau lumineux de lumière concentrée.

Il existe différentes techniques pour transmettre la lumière dans le conduit. Il peut s'agir d'un conduit plan (figure 2a), d'un conduit équipé de lentilles (figure 2b), d'un conduit recouvert d'une surface très réfléchissante (figure 2c), d'un conduit recouvert d'éléments prismatiques (figure 2d) ou équipé de fibres optiques (figure 2e).

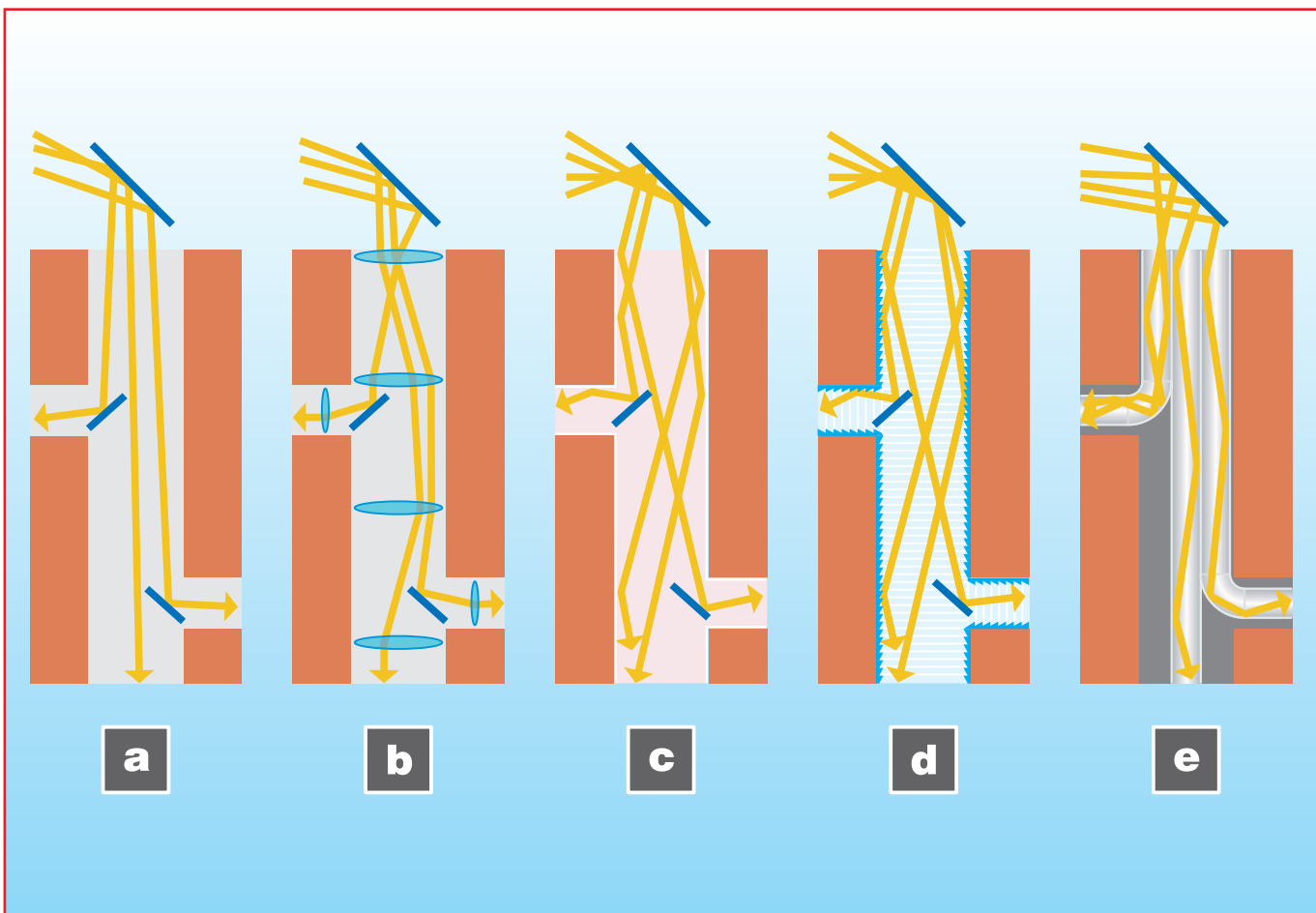
Le système qui distribue la lumière dans le local à éclairer est similaire à un luminaire utilisé pour éclairer artificiellement. Il peut être de type direct, direct/indirect ou indirect.

Il existe également des conduits lumineux horizontaux qui permettent de conduire la lumière dans des locaux profonds éclairés latéralement. Ce sont, par exemple, les systèmes anidoliques.

Un conduit solaire est un dispositif qui sert à transmettre la lumière solaire directe au cœur même du bâtiment, dans des locaux qui ne peuvent pas profiter de lumière naturelle.



Exemple d'un conduit solaire. 1



2 Les différentes techniques utilisées pour transmettre la lumière dans le conduit.

Les stores réfléchissantes

Ces stores peuvent être fixes ou mobiles.

Il existe beaucoup de différents types de store vénitiens réfléchissants. Ceux-ci consistent généralement en une surface supérieure très réfléchissante, présentant parfois des perforations et une courbure concave. Les stores réfléchissants sont généralement placés à l'intérieur d'un double vitrage et ont environ 10 à 12 mm de largeur. Ils sont conçus de manière à réfléchir un maximum de lumière vers le plafond tout en présentant une faible luminosité pour des angles situés en dessous de l'horizontal.

Le système "fish"

Ce système est constitué de lamelles horizontales fixes de section triangulaire spécialement alignées et fixées entre-elles. Le système, conçu uniquement pour des fenêtres verticales, a comme objectif de limiter l'éblouissement et de rediriger la lumière diffuse. Un système d'ombrage supplémentaire est nécessaire si les gains solaires et l'admission de soleil direct doivent être limités. Les lamelles sont conçues de manière à ce que la portion supérieure du ciel soit transmise vers le plafond. Théoriquement, un système présentant une surface en aluminium de coefficient de réflexion de 85 % transmet 60 % de lumière diffuse (sans tenir compte du vitrage).

Le système "okasolar" (figure 2a)

Ce système est constitué de lamelles réfléchissantes de section triangulaire, placées dans un double vitrage. Il redirige la lumière selon un angle variant en fonction de son angle d'incidence. En hiver, une partie de la lumière est réfléchi vers le plafond tandis qu'une autre partie est transmise directement. En été, une partie de la lumière est réfléchi vers le plafond tandis que le reste est réfléchi vers l'extérieur. Les lamelles sont conçues en fonction de la latitude du lieu où elles sont placées.

Le système "ETAP" (figures 2b et c)

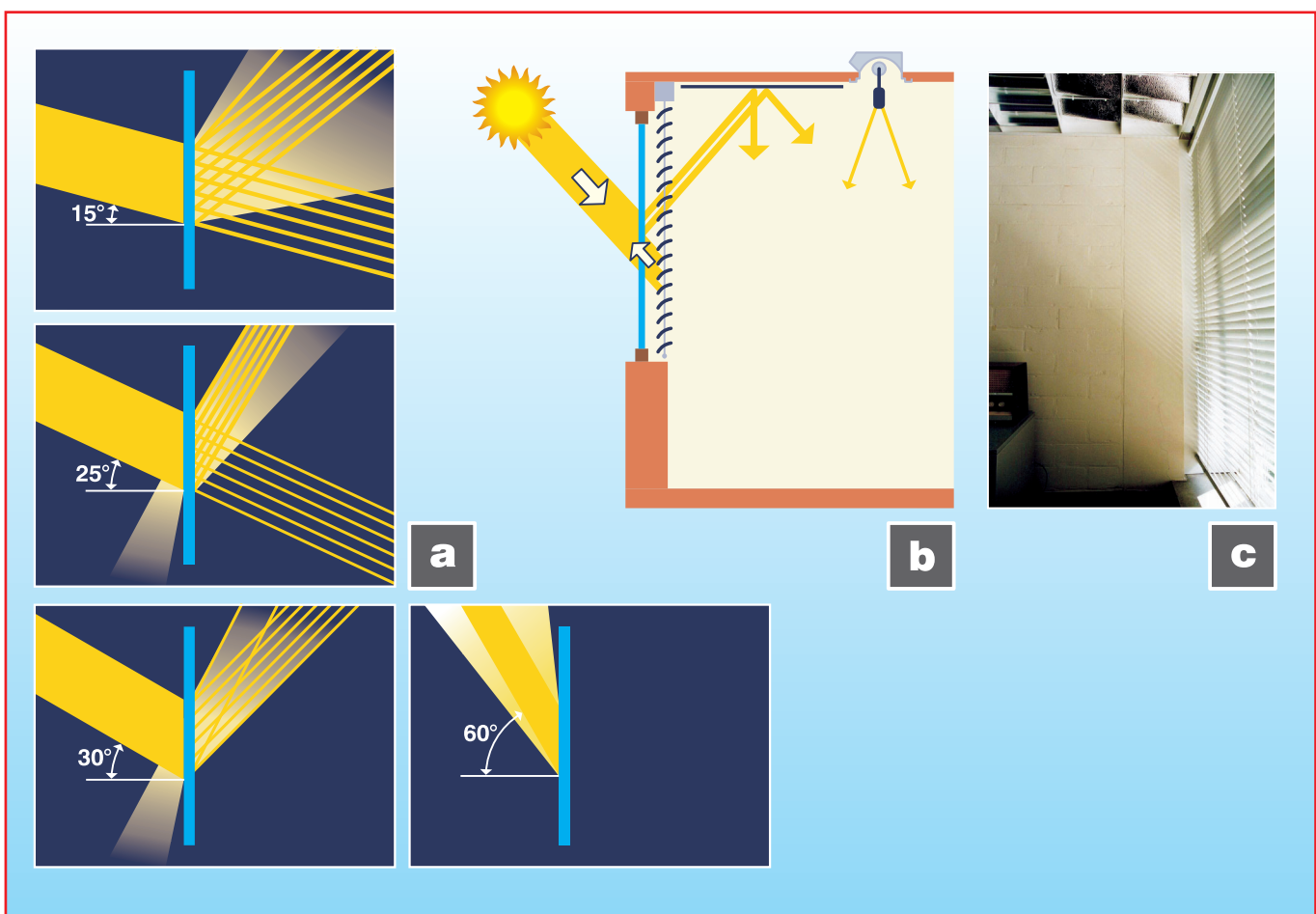
Il s'agit d'une combinaison d'un store vénitien très réfléchissant avec un plafond réfléchissant à géométrie spéciale.

De l'intérieur, ces stores ont le même aspect que des stores vénitiens classiques mais ils sont recouverts d'un film très réfléchissant. La quantité de lumière directe qui pénètre dans le local vaut 2 à 3 % de la lumière directe disponible. Cette lumière est dirigée vers le plafond qui, par sa géométrie spéciale, la répartit dans l'ensemble du local.

Les stores réfléchissantes sont utilisés dans le double but de protéger un espace du rayonnement solaire direct tout en redirigeant la lumière naturelle vers le fond du local.



Système de redirection de la lumière **1**
(Okasolar).



2 a : Système Okasolar.
b : Schéma de fonctionnement du système "ETAP".
c : Redirection de la lumière vers le plafond dans un local équipé du système "ETAP".

Ces systèmes sont basés sur des principes de réflexion et de réfraction de la lumière, lorsque celle-ci traverse des matériaux différents. Ils sont en général fort coûteux et posent parfois des problèmes de diffraction de la lumière, c'est-à-dire de coloration de celle-ci. Ils ne devraient pas être utilisés dans des nouveaux projets, pour compenser une mauvaise conception de l'éclairage naturel mais peuvent s'avérer intéressants en rénovation ou pour des cas très précis soumis à des contraintes désavantageuses pour l'éclairage naturel. Voici quelques exemples de systèmes directionnels :

Les panneaux prismatiques (figure 2a)

Les panneaux prismatiques sont des panneaux plats et minces, profilés en dents de scie et fabriqués en acrylique clair. Ils sont utilisés en climat tempéré pour rediriger ou réfracter la lumière. C'est la géométrie des prismes et la position des panneaux qui déterminent les propriétés du système. Quand ils sont utilisés comme ombrages, les panneaux prismatiques réfractent la lumière directe mais transmettent la lumière diffuse. Ils sont très souvent intégrés dans des doubles vitrages pour des questions de maintenance. Ces panneaux offrent une certaine transparence mais sont également responsable d'une distorsion de la vue vers l'extérieur. Il convient donc d'utiliser ces panneaux uniquement en partie supérieure d'une fenêtre, de manière à ce que la vue des occupants vers l'extérieur soit maintenue. Ces panneaux présentent de grands risques de coloration de la lumière lorsqu'ils sont utilisés comme systèmes d'ombrage fixes. Il faut alors installer des composants supplémentaires (comme, par exemple une feuille de verre traitée à l'acide) afin de pallier à ce problème.

Les "laser cut panels" (figure 2b)

Le laser-cut panel est un panneau fin divisé en une série d'éléments rectangulaires par coupures au laser dans un matériau acrylique. Ces panneaux assurent une bonne visibilité vers l'extérieur. Placés verticalement, ils induisent une déflexion de la lumière provenant des angles d'incidence élevés ($>30^\circ$) alors qu'ils transmettent la lumière à de faibles incidences. Placés horizontalement, ils agissent en tant que protection solaire. Ils peuvent être employés comme système fixe ou mobile.

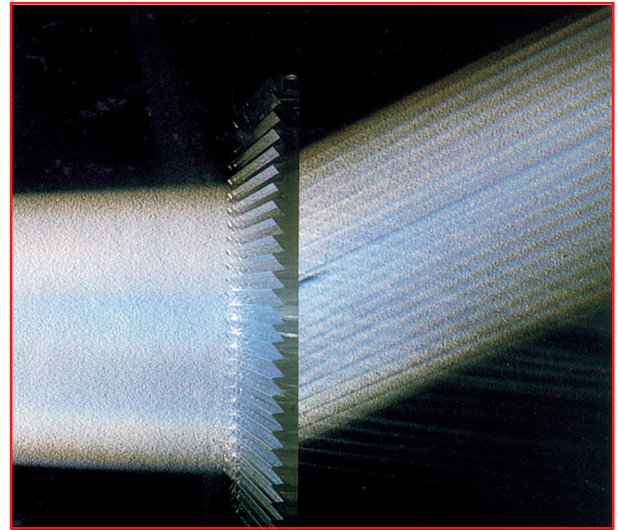
Les éléments acryliques (figure 2c)

Ce sont des éléments concaves qui sont superposés et placés à l'intérieur d'un double vitrage. Ils offrent la possibilité de rediriger la lumière directe provenant de n'importe quelle direction vers le plafond du local. Celui-ci joue un rôle important dans la répartition de la lumière puisqu'il reçoit la lumière réfléchiée par les éléments acryliques et la redirige vers le plan de travail. Le plafond peut donc avoir une forme étudiée spécifiquement pour cette fonction mais un plafond classique blanc très réfléchissant donne déjà de bons résultats.

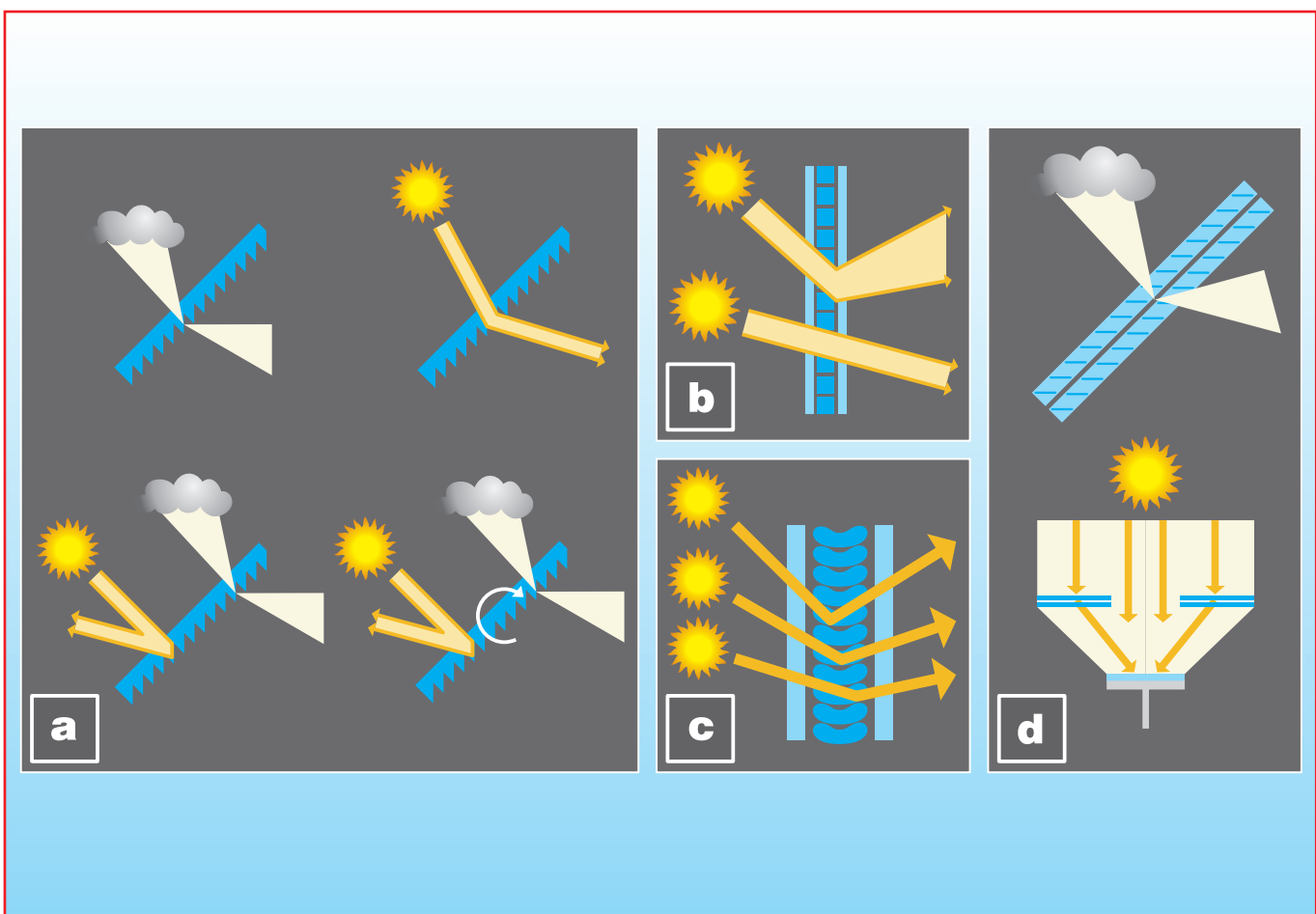
Les systèmes optiques holographiques (HOE) (figure 2d)

Les systèmes holographiques ne sont encore qu'au début de leur développement. Le procédé holographique consiste en une couche de matériau diffractant qui est choisie pour rediriger la lumière selon un angle spécifique, en fonction de l'angle d'incidence de la lumière. Ils permettent, par exemple, de rediriger la lumière diffuse tout en rejetant la lumière directe.

Différents systèmes permettent de rediriger ou de bloquer la lumière selon des angles d'incidence et/ou de transmission précis. Ces différents systèmes sont soit utilisés comme systèmes d'ombrage, soit pour distribuer la lumière plus profondément dans le local.



Système de prisme redirigeant la lumière. 1



2 a : Panneaux prismatiques
c : Éléments acryliques

b : Laser-cut panels
d : Systèmes optiques holographiques

Les vitrages électrochromes et gasochromes sont des vitrages dynamiques qui peuvent s'obscurcir ou s'éclaircir de manière continue et réversible sous l'effet, respectivement, d'une tension électrique de quelques volts ou de l'injection d'un gaz dans la cavité. Leurs propriétés optiques et thermiques peuvent donc être modifiées en fonction des conditions climatiques. Durant l'été, la transmission est réduite pour prévenir la surchauffe alors que durant les périodes froides, la transmission est augmentée de manière à profiter au maximum de l'éclairage naturel et des gains solaires. La coloration des vitrages peut aussi varier journalièrement en fonction de l'évolution du soleil.

Les vitrages électrochromes

Chaque phase de coloration ou de décoloration résulte d'un transfert de charge électronique et ionique entre deux couches minces par l'intermédiaire d'un électrolyte. La transmission de ce type de vitrage reste constante tant qu'aucune nouvelle tension n'est appliquée. En inversant la polarité, on retrouve l'état initial de transparence et de transmission lumineuse.

Le matériau électrochrome le plus utilisé est le trioxyde de tungstène qui se colore en bleu foncé. Ce système possède une transmission lumineuse adaptable entre 50 % (état décoloré) et 15 % (état coloré) selon la quantité d'ions échangée. Simultanément, le facteur solaire du vitrage varie de 12 % à environ 45 %. De tels vitrages existent en laboratoire et commencent à être disponibles sur le marché dans des surfaces approchant le m². Toutefois, plusieurs difficultés subsistent encore : l'homogénéité, la durabilité sous l'effet des cycles et les applications spécifiques au bâtiment butent encore sur la résistance du système aux UV.

Les vitrages gasochromes

Une unité gasochrome est formée d'un vitrage isolant gasochrome, d'une unité d'alimentation de gaz et d'une unité de contrôle. Le composant actif d'un système gasochrome est, comme pour le vitrage électrochrome, un film de trioxyde de tungstène (WO₃). Il est situé sur la face intérieure du vitrage extérieur du triple vitrage. Quand ce film gasochromic est exposé à une faible concentration d'hydrogène contenue dans un gaz porteur (argon ou nitrogène), il se colore en bleu. Lorsqu'il est exposé à de l'oxygène, il se décolore et retourne à l'état initial transparent. Le mélange de gaz est introduit dans la cavité située entre le vitrage extérieur et le vitrage intermédiaire. L'unité d'alimentation de gaz consiste en un électrolyser et une pompe, qui sont connectés à la fenêtre par des tuyaux formant une boucle fermée. Idéalement, l'unité de gaz devrait être intégrée à la façade. Une unité de gaz produit suffisamment de gaz pour alimenter 10 m² de vitrage gasochrome. Le passage de l'état clair à l'état coloré (et inversement) prend de 2 à 10 minutes.

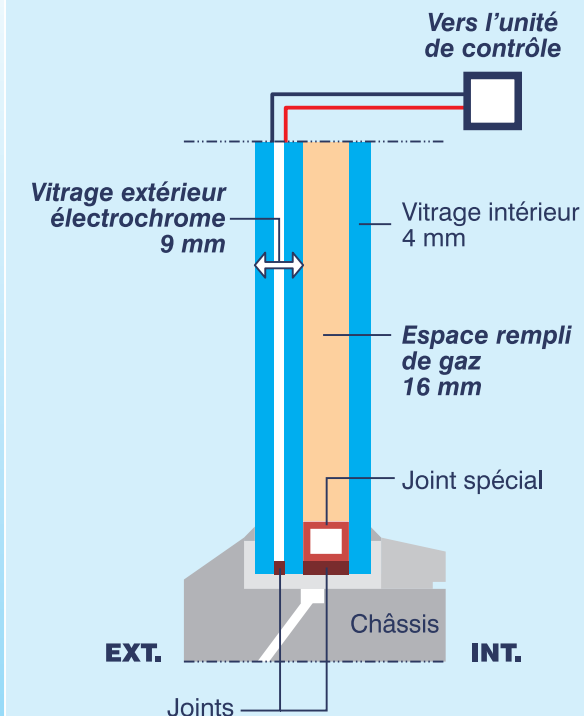
La production expérimentale de vitrage de 1,5 m x 1,8 m a débuté en 2002. La livraison commerciale de systèmes gasochromes est prévue pour le milieu de l'année 2003.

Un vitrage dynamique est un vitrage dont les propriétés physiques évoluent au cours du temps.

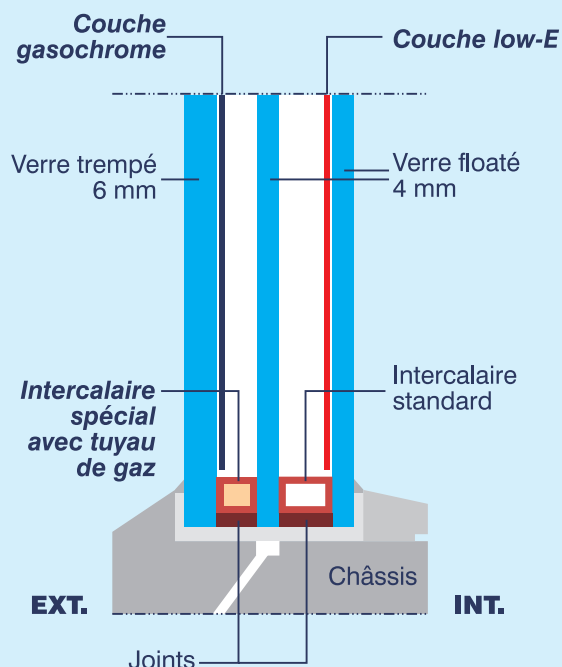


Vitrage électrochromes en phase de coloration (à droite) ou de décoloration (à gauche). **1**

Vitrage électrochrome



Vitrage gasochrome



2 a : Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome.
b : Principe de fonctionnement d'un vitrage gasochrome.

Une centrale photovoltaïque est une installation solaire qui permet de convertir directement les rayons du soleil en électricité, sans bruit ni mouvement, par un phénomène simple : lorsque les photons, "grains de lumière" en provenance du soleil, viennent percuter les cellules photovoltaïques, ils transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur constituant les cellules (généralement du silicium). Ce transfert d'énergie crée une mise en mouvement immédiate des électrons, générant ainsi un courant électrique.

L'assemblage de cellules photovoltaïques forme un module photovoltaïque. Les modules les plus courants délivrent une puissance de 50, 75 ou 100 Wc (Watt-crête) et ont une superficie respective voisine de 0,5, 0,75 et 1 m².

Le regroupement de plusieurs modules entre-eux constitue un générateur photovoltaïque (figure 1). Le courant électrique qu'il produit peut être injecté sur le réseau électrique ou utilisé directement sur le site de production.

Le générateur photovoltaïque est en général intégré au bâtiment. On distingue actuellement deux grandes familles d'intégration au cadre bâti (figure 2) :

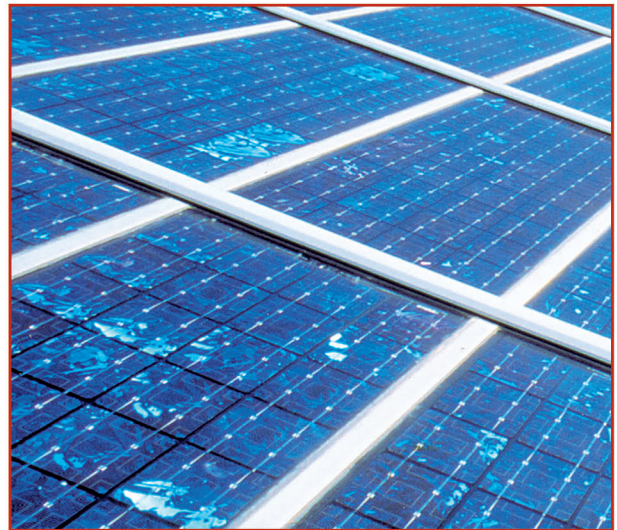
- les réalisations en sur-imposition sur des ouvrages existants, ne réalisant pas de fonction de clos ni de couvert :
 - sur toiture inclinée couverte en éléments discontinus ;
 - sur toiture-terrasse ou toiture revêtue d'une étanchéité ;
 - fixation sur un mur isolé ou non isolé, par l'extérieur ;
 - fixation sur une façade légère ;
 - visière de balcon ou brise-soleil ;
 - garde-corps de balcon.
- les réalisations en intégration prenant part aux fonctions de clos et de couvert :
 - élément de toiture inclinée couverte en éléments discontinus ;
 - élément de verrière ;
 - paroi extérieure opaque d'un remplissage de façade rideau ;
 - élément verrier extérieur d'un vitrage isolant ;
 - élément de paroi dans toute son épaisseur d'une partie de façade ;
 - élément de bardage devant un mur en béton.

Un générateur photovoltaïque d'une superficie de 10 m², soit une puissance de 1 kWc, permet de produire en moyenne, en France, 1 000 kWh électrique par an (pour une inclinaison et une orientation optimales).

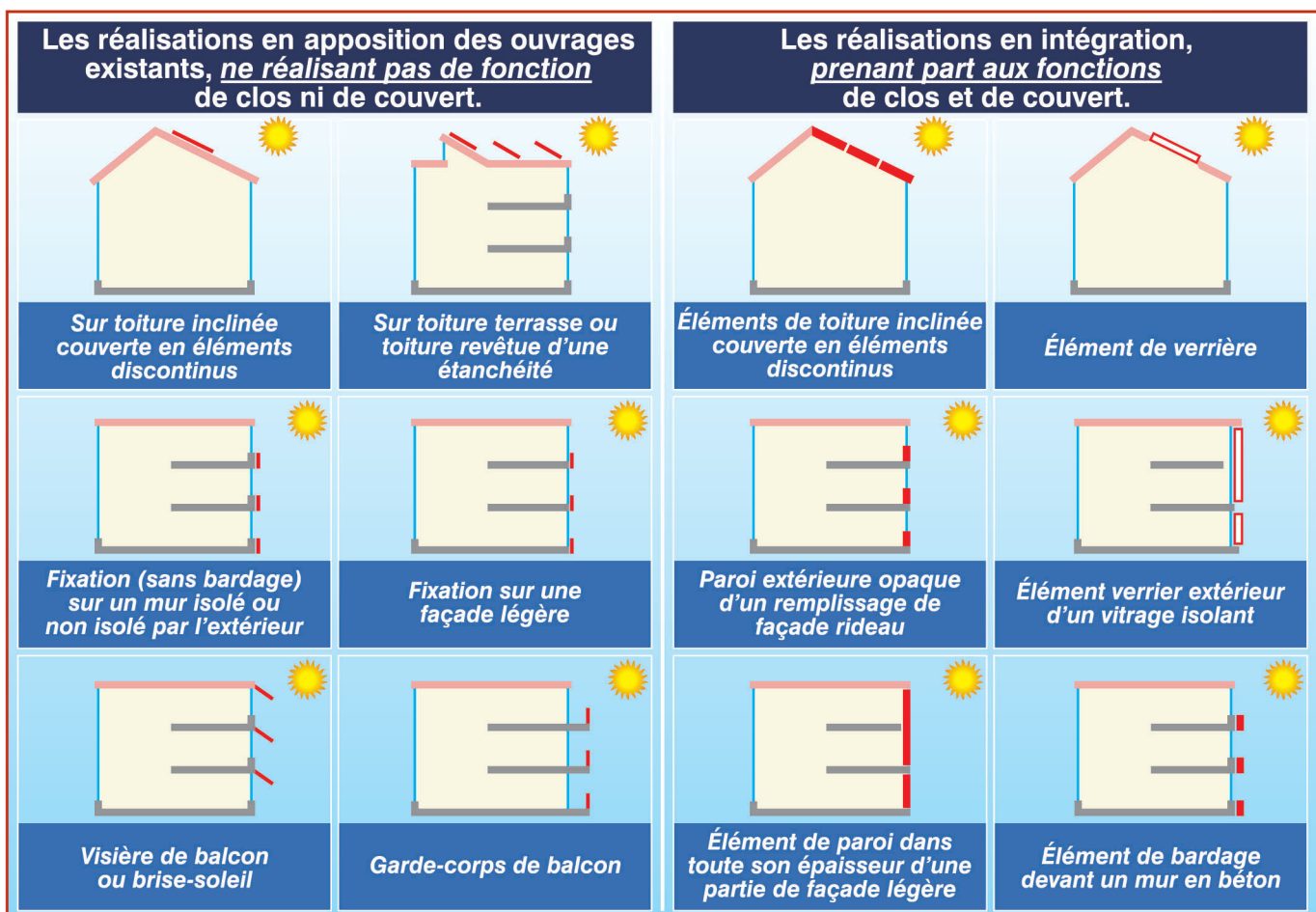
La consommation électrique moyenne d'un ménage européen, hors consommation pour le chauffage, est de l'ordre de 3 700 kWh par an. Elle est utilisée à plus de 75 % pour alimenter les appareils électro-ménagers et à 6-7 % pour l'éclairage (environ 250 kWh). Dans ce cas, le générateur photovoltaïque permet donc de couvrir l'ensemble des besoins électriques d'un ménage pour l'éclairage, ainsi qu'une partie des besoins électriques pour les appareils électro-ménagers.

Précisons enfin que les lampes fluocompactes basse consommation sont idéalement complémentaires à une installation photovoltaïque et qu'elles permettent, en outre, de réduire notablement les besoins électriques du poste éclairage.

Une centrale photovoltaïque est une installation solaire qui permet de convertir directement les rayons du soleil en électricité. Sa production peut couvrir totalement ou partiellement les besoins électriques pour l'éclairage.



Générateur photovoltaïque constitué d'un assemblage de modules photovoltaïques. **1**



2 Les différentes possibilités d'intégration du photovoltaïque au bâtiment (source : Ademe).

Technologie développée principalement en Allemagne et au Japon, les modules photovoltaïques translucides commencent peu à peu à s'imposer sur le marché français et européen.

Leur différence avec les modules photovoltaïques "traditionnels" réside essentiellement dans l'épaisseur du matériau encapsulant les cellules et dans la taille de l'interstice entre ces mêmes cellules. Fabriqués sur mesure, ils laissent aux maîtres d'ouvrages le choix de la dimension, de la forme (rectangle, trapèze, triangle...), de la couleur et du niveau de transparence, le tout dans le respect des normes de sécurité en vigueur dans la construction. Il convient cependant de préciser que la pose d'un film de couleur sur les cellules photovoltaïques génère une légère baisse de leur rendement.

Les modules photovoltaïques translucides sont constitués de verre feuilleté (verre/intercalaire/verre) dont l'épaisseur et les traitements sont variables en fonction du cahier des charges de chaque projet. Le vitrage extérieur est, en général, constitué d'un verre extra-blanc, garantissant une bonne efficacité de la production électrique des cellules. Quant au vitrage intérieur, il est fonction des performances souhaitées : efficacité thermique, résistance mécanique, etc.

Les cellules photovoltaïques sont des cellules classiques, mono ou polycristallines, associées électriquement entre elles et positionnées sous le verre extérieur (intercalaire). Leur distance d'espacement est fonction du niveau de transparence ou de l'esthétique souhaités. Plus l'espacement sera important et plus la quantité de lumière qui pénétrera dans le bâtiment sera conséquente.

L'autre atout, non moins important des modules photovoltaïques translucides, tient dans leur capacité à se substituer à un élément conventionnel de structure de façade ou de toiture.

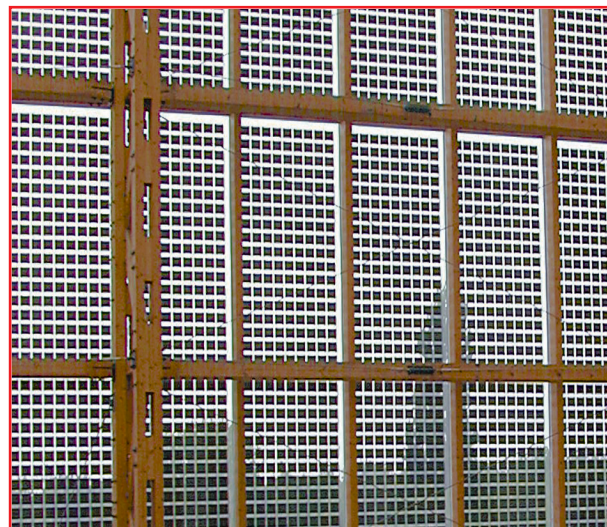
L'intégration en façade répond toutefois à de plus lourdes contraintes que l'intégration en toiture et on estime que le rendement d'une installation intégrée en façade est inférieur de 20 à 30 % à celui obtenu pour une orientation optimale. Par ailleurs, du fait de la taille des interstices entre les cellules, les modules photovoltaïques translucides comportent moins de cellules que les modules "traditionnels", leur puissance et leur production en sont donc proportionnellement affectées. Enfin, la fabrication sur mesure de ces modules entraîne des coûts de production légèrement supérieurs à ceux des modules "traditionnels".

Néanmoins, la modularité de ces matériaux, la souplesse d'utilisation, la grande palette des jeux d'ombrage, de lumière et de couleurs qui en découle, laisse présager un avenir prometteur à cette technologie qui, par ailleurs, permet aux architectes d'exercer toute leur créativité.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL
Le photovoltaïque : une technologie au service de l'éclairage naturel et artificiel

Tamiser la lumière : les modules photovoltaïques translucides

Les modules photovoltaïques translucides sont constitués de cellules photovoltaïques, plus ou moins espacées, insérées entre deux feuilles de verre. Ils peuvent se substituer à un élément de paroi et permettent de tamiser la lumière tout en produisant de l'électricité.



Modules photovoltaïques translucides. 1



2 Intégration de modules photovoltaïques translucides comme éléments de paroi et de toiture à l'académie de formation de Herne-Sodingen (Allemagne) (arch. Jourda-Perraudin-HHS).

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL

Le photovoltaïque : une technologie au service de l'éclairage naturel et artificiel

Exemples d'une façade photovoltaïque translucide : la maison du tourisme et des Cévennes

La maison du tourisme et des Cévennes à Alès dans le Gard (France) est aménagée dans les vestiges d'une église du XI^e siècle. Il ne reste du bâtiment d'origine que le clocher et un long pan de la nef constitué de trois grandes arches de 13 mètres de hauteur par 6 mètres de largeur, appuyées sur un immense mur d'un mètre d'épaisseur.

La façade principale est exposée sud/sud-ouest (218°). Les façades est et ouest, percées de petites ouvertures présentent une surface minime.

Pour retrouver de la surface utile, trois volumes de bureaux, portés par une structure métallique, ont été construits en encorbellement sous les arches, fermés par 3 murs-rideaux constitués de panneaux photovoltaïques translucides (figure 2).

Ces murs-rideaux translucides assurent 3 fonctions :

- 1. une fonction de maîtrise de l'éclairage naturel**, éventuellement variable en fonction des besoins et de l'état du ciel.

Pour que les bureaux bénéficient d'un éclairage naturel, les modules photovoltaïques sont de type bi-verre sans film opaque. Ils sont transparents entre les cellules et en périphérie sur 15 % de leur surface et laissent donc passer une part significative de l'ensoleillement direct. La figure 1 montre l'intérieur d'un bureau de la maison du tourisme et des Cévennes d'Alès avec l'effet des capteurs photovoltaïques sur le tamisage de l'éclairage naturel.

- 2. une fonction de production d'électricité**, couplée au réseau.

Chaque mur-rideau est doté de 70 panneaux photovoltaïques de 46 Wc chacun, répartis sur 5 trames, constituant ainsi une centrale photovoltaïque d'une puissance totale de 9,5 kWc connectée au réseau électrique.

La production de la centrale avoisine les 6 500 kWh par an. Elle est relativement équilibrée en toute saison. En été, le déficit dû à la verticalité est partiellement compensé par la limitation de la surchauffe habituelle des cellules.

Pour optimiser l'intégration architecturale, les modules photovoltaïques ont été spécialement réalisés avec une couche antireflet brun noir s'alliant harmonieusement à la couleur blonde du calcaire. La connectique des modules a, pour sa part, été spécialement intégrée sur la tranche des panneaux, et les câbles courent dans les profils des murs-rideaux.

- 3. une fonction de récupération de chaleur**, par transparence directe (et stockage dans la masse thermique du bâtiment) et par récupération d'air chaud sur la face arrière des capteurs.

La surface sombre des cellules photovoltaïques constitue en soi un absorbeur thermique. Cependant, apparentés à un verre feuilleté, donc un simple vitrage, les modules ont de piètres caractéristiques d'isolation thermique. Pour y remédier, la paroi photovoltaïque est doublée côté intérieur de châssis équipés de doubles vitrages faiblement émissifs. Ces châssis sont posés derrière les ossatures des murs-rideaux, avec une lame d'air de 11 cm, ce qui permet de ventiler les murs-rideaux et de récupérer la chaleur.

Par ailleurs, pour limiter tous les ponts thermiques, les murs-rideaux sont carénés et isolés en périphérie.

Enfin, pour optimiser le rendement calorifique, la dernière rangée de vitrages, en haut des murs-rideaux, est occupée par des capteurs à air.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL

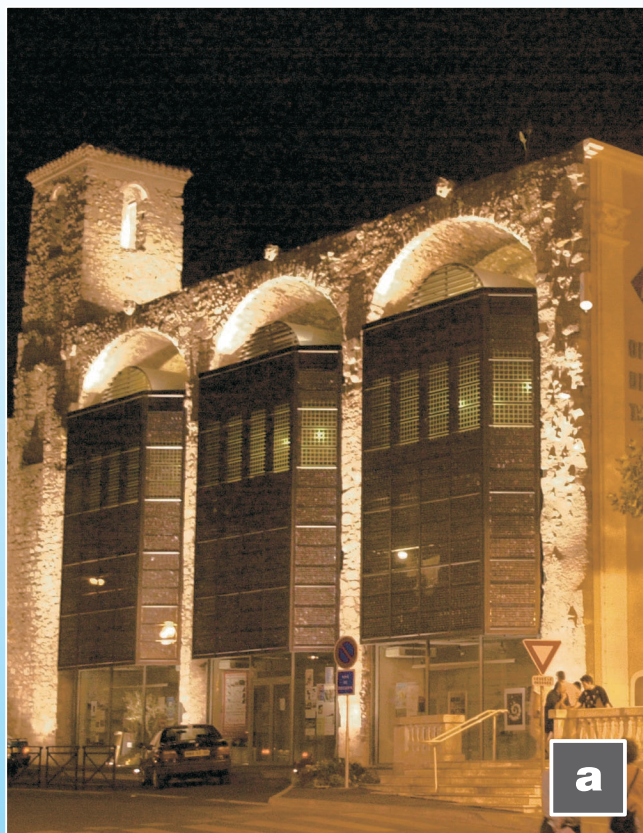
Le photovoltaïque : une technologie au service de l'éclairage naturel et artificiel

Exemples d'une façade photovoltaïque translucide : la maison du tourisme et des Cévennes

Les murs-rideaux photovoltaïques de la maison du tourisme et des Cévennes assurent 3 fonctions : maîtrise de l'éclairage naturel, production d'électricité et récupération de chaleur.



Lumière tamisée derrière le mur-rideau photovoltaïque. **1**



a



b

2 Maison du tourisme et des Cévennes à Alès (France) (arch. Y. Jautard).

Les techniques d'intégration des capteurs photovoltaïques translucides restent les mêmes quelles que soient leurs applications. Il convient, malgré tout, de tenir compte des contraintes supplémentaires, de sécurité, de normes, de nuisances, etc.

Les brise-soleil ou pare-soleil photovoltaïques

Les brise-soleil sont des installations fixes ou mobiles ayant pour but de protéger les parois et les ouvertures des rayonnements solaires directs. Les modules photovoltaïques translucides, outre leurs applications en façade et en toiture, peuvent idéalement remplacer les brise-soleil "classiques", généralement opaques. Ils permettent ainsi d'éviter un taux de pénétration trop important des rayonnements directs, tout en régulant le flux de lumière à travers les interstices des cellules notamment en été.

Le siège social de Total Énergie à La Tour de Salvagny dans le Rhône (France) illustre l'intégration des modules photovoltaïques translucides sous forme de brise-soleil. La façade sud (figure 2) est la plus expressive du bâtiment. Sa géométrie est d'une grande simplicité avec, au rez-de-chaussée et à l'étage, des fenêtres en bandeau sur quasiment toute la longueur de l'édifice. Le point fort dans la composition de cette façade réside dans l'intégration de 120 modules photovoltaïques translucides répartis sur deux rangées (54 au rez-de-chaussée et 66 à l'étage). Les modules totalisent une puissance électrique de 5,88 kWc et dispensent une lumière tamisée bleutée aux bureaux sud du bâtiment.

Les vitrages photovoltaïques semi-transparents (figure 1)

Utilisant la technologie des couches minces, les vitrages photovoltaïques semi-transparents ont la particularité d'exploiter les avantages du silicium amorphe. Déposée(s) sur un matériau vitré, la (ou les) couche(s) de silicium ont généralement une épaisseur inférieure à 1 mm, mais n'ont qu'un faible rendement (environ 5 à 8 %) comparé aux cellules cristallines (12 à 16 %).

Cette technique permet de ne pas bloquer l'accès des rayons solaires au niveau des vitrages, mais d'employer des vitres semi-transparentes qui laissent passer seulement la quantité et/ou la partie du spectre voulue pour assurer un éclairage et un apport d'énergie convenables.

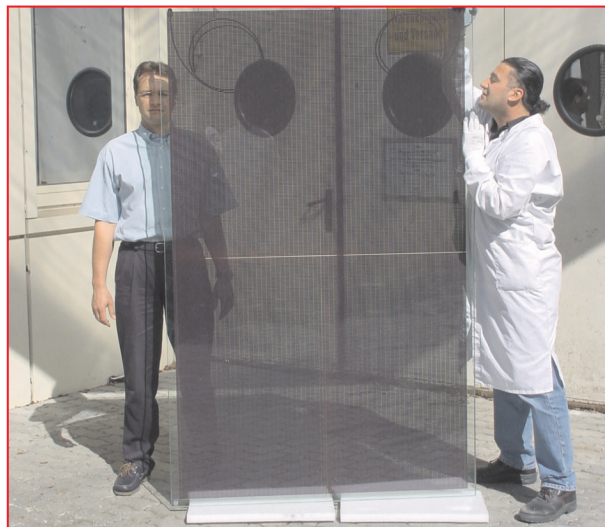
De plus, du fait de leur semi-transparence, les cellules photovoltaïques fonctionnent aussi bien à la lumière du soleil (extérieure) qu'à la lumière artificielle (intérieure).

Les conditions de fabrication nettement plus intéressantes, notamment des quantités moindres de matériaux requises, et une plus grande facilité d'intégration aux constructions, en font une technologie à fort potentiel de développement.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL
Le photovoltaïque : une technologie au service de l'éclairage naturel et artificiel

Autres applications : brise-soleil et vitrages photovoltaïques semi-transparents

Brise-soleil translucides et vitrages photovoltaïques semi-transparents : deux nouvelles applications du photovoltaïque au service de l'éclairage naturel et artificiel.



Vitrage photovoltaïque semi-transparent. **1**



2 Brise-soleil photovoltaïques translucides sur la façade sud du siège social de Total Énergie (La Tour de Salvagny - France) (arch. J. Ferrier).

Les lampes à incandescence

Les lampes à incandescences sont les lampes les plus connues du grand public et les plus utilisées dans le domestique, avec les lampes halogènes. La lumière est produite par l'échauffement d'un filament de tungstène porté à température élevée par le passage d'un courant électrique.

Le flux lumineux d'une lampe à incandescence est assez faible, tout comme son efficacité lumineuse ainsi que sa durée de vie. La lumière fournie par une lampe à incandescence standard est de couleur blanc-chaud et l'indice de rendu des couleurs de ce type de lampe est excellent.

Les lampes halogènes

Comme dans les lampes à incandescence classiques, la lumière est produite par le passage d'un courant électrique dans un filament de tungstène. Cependant, le bulbe en verre est rempli d'un gaz halogène qui permet aux particules de tungstène de se redéposer sur le filament après volatilisation et empêche donc tout noircissement de l'ampoule, pour autant que la température soit suffisamment élevée (600°C).

La durée de vie d'une lampe halogène est donc meilleure que celle d'une lampe à incandescence, tout comme son efficacité lumineuse.

L'indice de rendu des couleurs d'une lampe halogène est excellent.

Les lampes à décharge

Ces lampes fonctionnent par décharge d'un courant électrique dans une atmosphère gazeuse de vapeur de mercure qui produit un rayonnement ultraviolet invisible. Ce rayonnement est absorbé par le revêtement intérieur de la lampe (luminescence) et converti en rayonnement visible.

On fait une distinction entre les lampes à basse et à haute pression selon la pression du gaz présent dans le tube. Toutes les lampes décrites ci-dessous, excepté les lampes à induction, sont des lampes à décharge.

Les tubes fluorescents

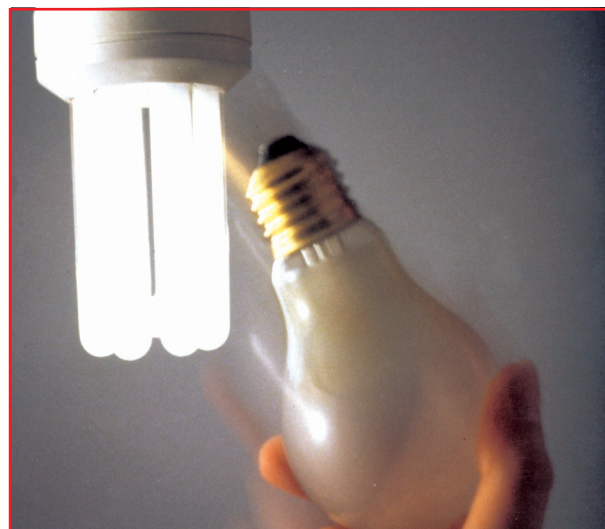
Les lampes fluorescentes utilisent de la vapeur de mercure sous basse pression. Les lampes fluorescentes ont une très bonne efficacité lumineuse, ce qui en fait les lampes de prédilection pour les immeubles de bureaux. Selon la composition chimique de la couche fluorescente, placée à l'intérieur du tube à décharge, la température de couleur va du blanc chaud au blanc froid de type lumière du jour.

L'indice de rendu des couleurs est influencé par la composition chimique de la couche fluorescente. Contrairement aux premiers tubes fluorescents, les tubes actuels peuvent avoir des indices de rendu des couleurs très élevés. La durée de vie d'un tube fluorescent dépend du type de ballast qui lui est associé et est beaucoup plus importante que celle des lampes à incandescence et halogènes.

Les lampes fluocompactes (figure 1)

Les lampes fluocompactes sont des lampes fluorescentes compactes dont les dimensions sont réduites jusqu'à approcher ou égaler les dimensions des lampes incandescentes. Ces lampes nouvelles bénéficient des caractéristiques exceptionnelles des lampes fluorescentes (faible consommation d'énergie, forme compacte et entretien aisé, haute qualité de la lumière). Elles sont surtout utilisées en remplacement des lampes à incandescence, dans le secteur résidentiel.

Il existe une grande variété de lampes sur le marché. Elles se différencient par leurs principes de production de lumière qui influencent leurs caractéristiques principales.



1 Une lampe fluocompacte remplace idéalement une lampe à incandescence et consomme 5 fois moins d'énergie.



2 Les différentes lampes existantes.

Les lampes à vapeur de mercure haute pression

La lampe à vapeur de mercure haute pression est aujourd'hui démodée pour plusieurs raisons : son efficacité lumineuse est faible, de même que son indice de rendu des couleurs. De plus, sa durée de vie n'est pas très élevée et elle est défavorable à l'environnement. Cette lampe a été surtout utilisée en éclairage public. Actuellement, elle n'est plus utilisée que pour le remplacement des lampes existantes.

Les lampes à vapeur de sodium

La lampe au sodium émet une lumière monochromatique jaune-orangée au maximum de la sensibilité de l'oeil. Cette lumière monochromatique lui confère la plus haute efficacité lumineuse de toutes les lampes.

La lampe à vapeur de sodium basse pression a un très mauvais indice de rendu des couleurs. Elle est principalement utilisée pour l'éclairage des autoroutes car l'efficacité lumineuse est très élevée et que le rendu des couleurs n'y est pas primordial.

Les lampes à vapeur de sodium haute pression présentent des puissances et des efficacités lumineuses moindres que celles que l'on obtient avec du sodium à basse pression mais ont un indice de rendu des couleurs un peu meilleur (au détriment de l'efficacité lumineuse).

Certaines lampes au sodium haute pression peuvent remplacer directement les lampes au mercure haute pression.

Les lampes aux halogénures métalliques

Elles ont un flux lumineux très élevé et une bonne efficacité lumineuse. Leur grand avantage par rapport aux lampes à vapeur de sodium est un bon indice de rendu des couleurs.

Ces lampes couvrent toute la gamme de puissance. Néanmoins, elles doivent être utilisées avec des accessoires adéquats (amorceur, vitres de protections pour certaines d'entre elles et protection UV pour certaines applications comme pour les bureaux). Ces lampes connaissent encore actuellement des problèmes de stabilité : la couleur de ces lampes peut devenir bleue ou rose après un certain temps.

Un de leurs avantages principal est leur petite taille qui leur permet d'être utilisées afin de créer une grande variété d'effets décoratifs avec ou sans utilisation de réflecteur. Ces lampes sont, par exemple, très intéressantes pour les commerces.

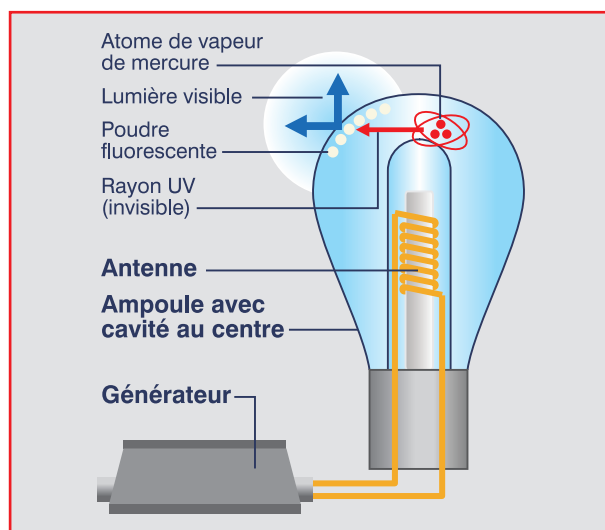
Les lampes à induction (figure 1)

La lampe à induction est une lampe à mercure basse pression qui ne contient pas d'électrode. L'ionisation des atomes est réalisée par un champ électromagnétique créé par la circulation d'un courant à haute fréquence dans une bobine appelée "antenne" et placée au centre de l'ampoule dans la cavité prévue à cet effet.

La durée de vie de cette lampe est exceptionnelle grâce à l'antenne placée à l'extérieur de l'ampoule. En effet, aucune usure ne se produit sur les composants puisqu'il n'y a plus ni électrode, ni filament.

La lampe à induction est utilisée là où la maintenance est difficile ou coûteuse, et dans des situations requérant de longues périodes de fonctionnement.

On choisira une lampe en fonction de l'application pour laquelle on la destine, de ses différentes caractéristiques techniques, mais aussi son aspect esthétique, sa possibilité de gradation...



Fonctionnement d'une lampe à induction. **1**

Types de lampe	Puissance (W)	Flux lumineux (lm)	Efficacité lumineuse (sans ballast) (lm/W)	IRC	T° de couleur (K)	Durée de vie moyenne (h)	Prix brut (HTVA) (c€/lm)
Incandescente normale	25 à 500	220 à 8 200	9 à 16	100	2 700	1 000	0,225 à 0,075
Incandescente halogène (tension du réseau)	40 à 2 000	500 à 50 000	12,5 à 25	100	3 000	2 000	1 à 0,02
Tube fluorescent	14 à 58	1 150 à 5 200	64 à 104	60 à 90	2 700 à 6 500	14 000 à 18 000	0,4 à 0,075
Fluo-compacte	5 à 55	200 à 4 800	39 à 87	80	2 700 à 4 000	8 000 à 13 000	7,5 à 0,2
Halogénures métalliques	35 à 2 000	3 400 à 189 000	68 à 96	65 à 85	3 000 à 4 600	10 000 à 17 500	2,2 à 0,1
Sodium haute pression	35 à 1 000	1 300 à 130 000	37 à 130	25 (85)	2 000 à 2 500	13 000	4,425 à 0,1
Mercure haute pression	50 à 1 000	1 770 à 58 500	35 à 58	33 à 49	3 900 à 4 300	15 000	0,325 à 0,1
Induction	55 - 85	3 500 - 6 000	65 - 70	80 - 85	2 700 à 4 000	60 000	50 à 30
Sodium basse pression	35 à 180	4 550 à 32 500	130 à 180	-	1 800	18 000	0,625 à 0,2

2 Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des lampes.

Un luminaire peut être composé de :

- l'armature qui permet l'assemblage des différents composants du luminaire (réflecteurs, ventelles, platine, diffuseur...) et la fixation du luminaire au plafond ou au mur ;
- le réflecteur qui réfléchit la lumière émise par la lampe et la dirige selon des directions préférentielles ;
- les ventelles qui protègent l'œil des éblouissements en empêchant la vue directe de la lampe ;
- le diffuseur ou protecteur qui remplace parfois les ventelles et protège la lampe de l'ambiance. On parle aussi de "vasque" ;
- la platine qui permet la fixation des auxiliaires électriques (ballasts, starters...).

L'ensemble des dispositifs chargés de contrôler la lumière émise (réflecteurs, ventelles) est aussi appelé "optique".

Le choix d'un luminaire est primordial. Il doit permettre une optimisation de la lumière émise par les lampes, tout en évitant les problèmes de réflexion et d'éblouissement. Outre les aspects esthétiques et photométriques, le choix d'un luminaire doit prendre en compte les aspects mécaniques, électriques et thermiques de celui-ci.

Les aspects photométriques du luminaire concernent son rendement, son angle de défilement, la protection contre l'éblouissement, les luminances, la distribution lumineuse ainsi que les caractéristiques photométriques propres aux matériaux utilisés pour le luminaire.

Le rendement d'un luminaire

Aucun luminaire ne restitue 100 % de la lumière émise par les lampes. Une part importante de cette lumière va être absorbée par les différents éléments du luminaire et transformée en chaleur.

Le rendement total η_l d'un luminaire est le rapport entre le flux lumineux émis par le luminaire et le flux lumineux des lampes. Il se situe entre 35 et 90 %. Il est d'autant plus bas qu'il y a des éléments (ventelles, globe opalin ou prismatique) devant les lampes afin d'éviter l'éblouissement ou pour favoriser l'esthétique.

L'angle de défilement (figure 2a)

L'angle de défilement d'un luminaire est l'angle sous lequel la source nue ne peut être vue par l'observateur. Il s'exprime en degré.

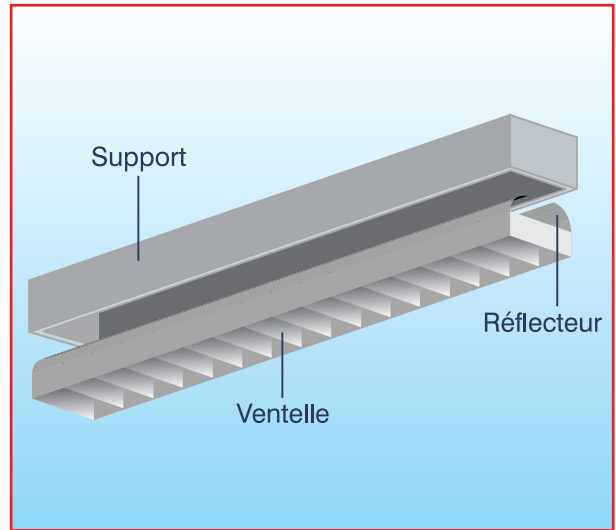
On parle d'angle de défilement dans la direction transversale et dans la direction longitudinale.

La protection contre l'éblouissement

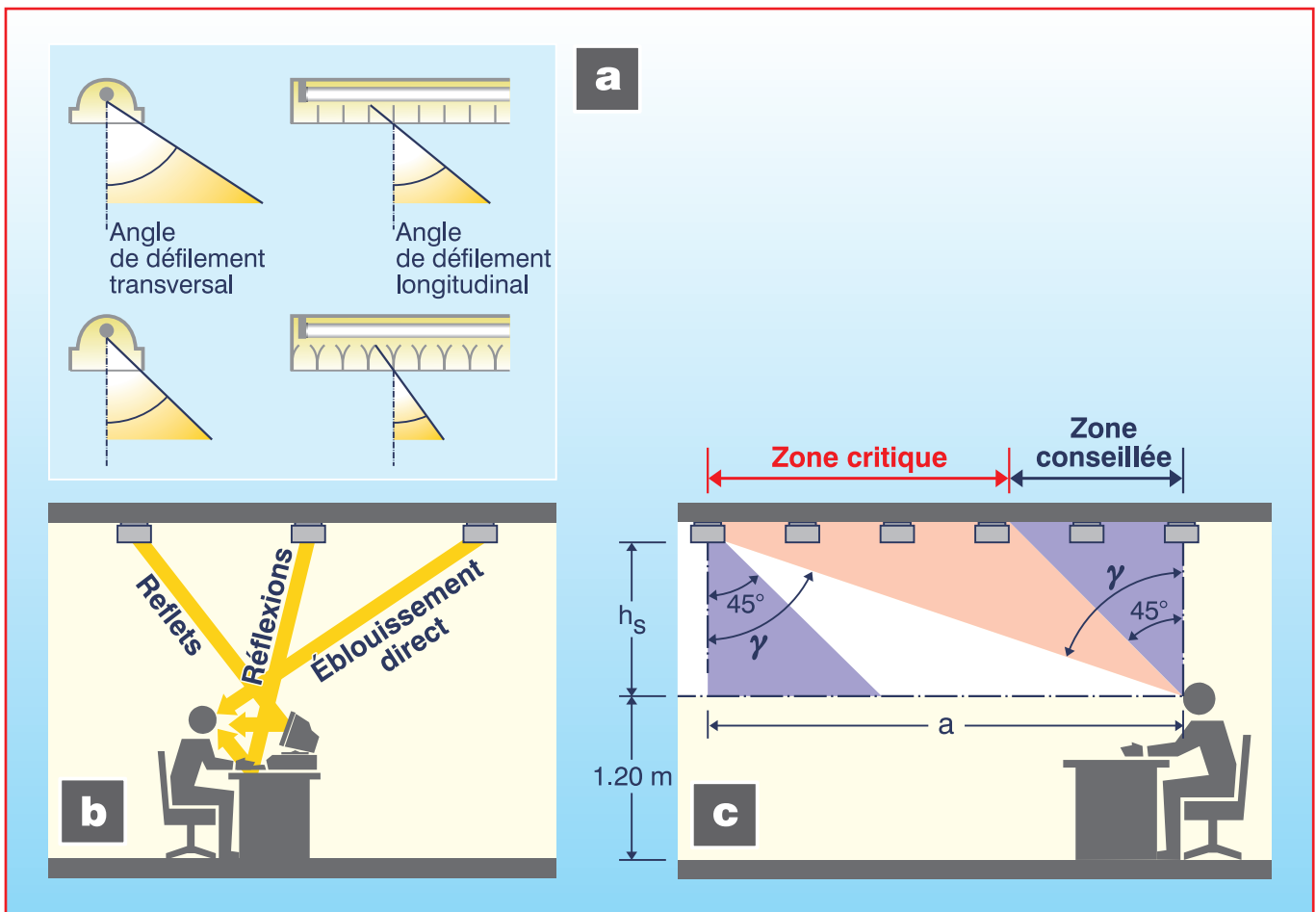
L'éblouissement dû à un luminaire peut provenir d'une vision directe de la source de lumière (éblouissement direct) et de la réflexion de la lumière sur une surface quelconque vers l'œil de l'observateur (éblouissement indirect) ou sur la tâche à réaliser (ce qui provoque un effet de voile) (figure 2b).

L'angle critique de vue directe d'un luminaire pour lequel on commence à avoir des problèmes d'éblouissement vaut 45° (par rapport à la verticale) (figure 2c).

Un luminaire sert à répartir, filtrer ou transformer la lumière des lampes.



Éléments composant un luminaire. 1



- 2 a: Angle de défilement d'un luminaire.
- b: Les différents types d'éblouissement.
- c: Zone critique de vue d'un luminaire.

Luminance moyenne et luminance de crête

La luminance moyenne d'un luminaire, exprimée en cd/m^2 , représente sa brillance. Celle-ci peut être à la base d'éblouissements ou de réflexions gênantes. Les luminaires dits " basse luminance " ont une luminance moyenne faible pour des angles supérieurs à leur angle de défilement.

De plus, un luminaire présente souvent ce que l'on appelle des luminances de crête. Celles-ci, gênantes lorsque l'on travaille de façon intensive sur ordinateur, sont dues à la réflexion de la lumière émise par la lampe sur le dos des ventelles. Pour prévenir ces taches lumineuses, certains fabricants prévoient des ventelles dont le dos profilé réoriente la lumière réfléchie pour éviter tout éblouissement.

Distribution lumineuse

La forme du réflecteur et les positions de la lampe permettent d'obtenir différents modèles de distributions lumineuses.

La distribution extensive donne un éclairage uniforme, permet un espacement plus important des luminaires et accentue les contrastes au niveau du plan de travail.

La distribution intensive concentre le faisceau lumineux vers le bas. Ce mode d'éclairage est intéressant pour l'éclairage des travées de grande hauteur ou pour le travail sur écran.

La distribution asymétrique permet d'éclairer, par exemple, des surfaces verticales telles que des tableaux ou des murs.

Caractéristiques photométriques des matériaux

Les matériaux utilisés influencent les caractéristiques photométriques des luminaires. D'une manière générale, grâce à un meilleur contrôle de la diffusion de lumière, les optiques miroitées ont des rendements lumineux nettement supérieurs et présentent moins de risques de réflexion sur les surfaces brillantes que les optiques peintes (en blanc ou gris). En effet, les optiques mates présentent une surface ne contrôlant aucune réflexion. Elles sont de ce fait caractérisées par une luminance plus importante.

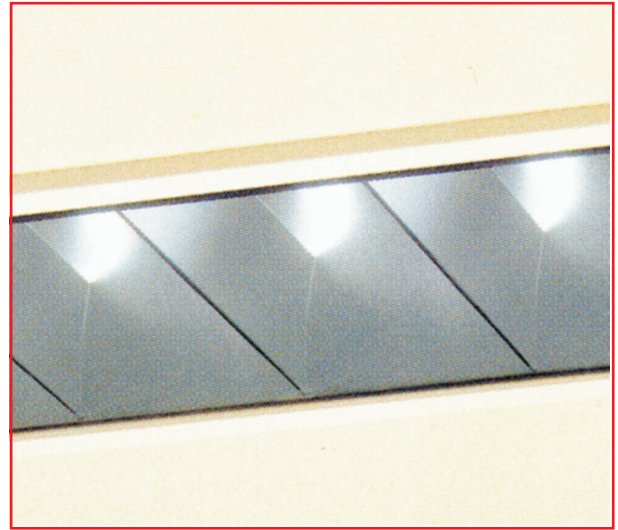
Parmi les optiques miroitées, on rencontre les réflecteurs spéculaires (aluminium poli ou brillanté), ou semi-spéculaires (aluminium satiné ou martelé). Pour les réflecteurs en tôle peinte en blanc ou en matériau plastique, on parlera de réflecteur diffusant.

L'aluminium brillanté offre la plus faible luminance propre. Cependant, les réflexions parasites de l'environnement dans le luminaire (on s'y voit presque comme dans un miroir) peuvent être désagréables. En outre, son encrassement est plus rapidement perceptible.

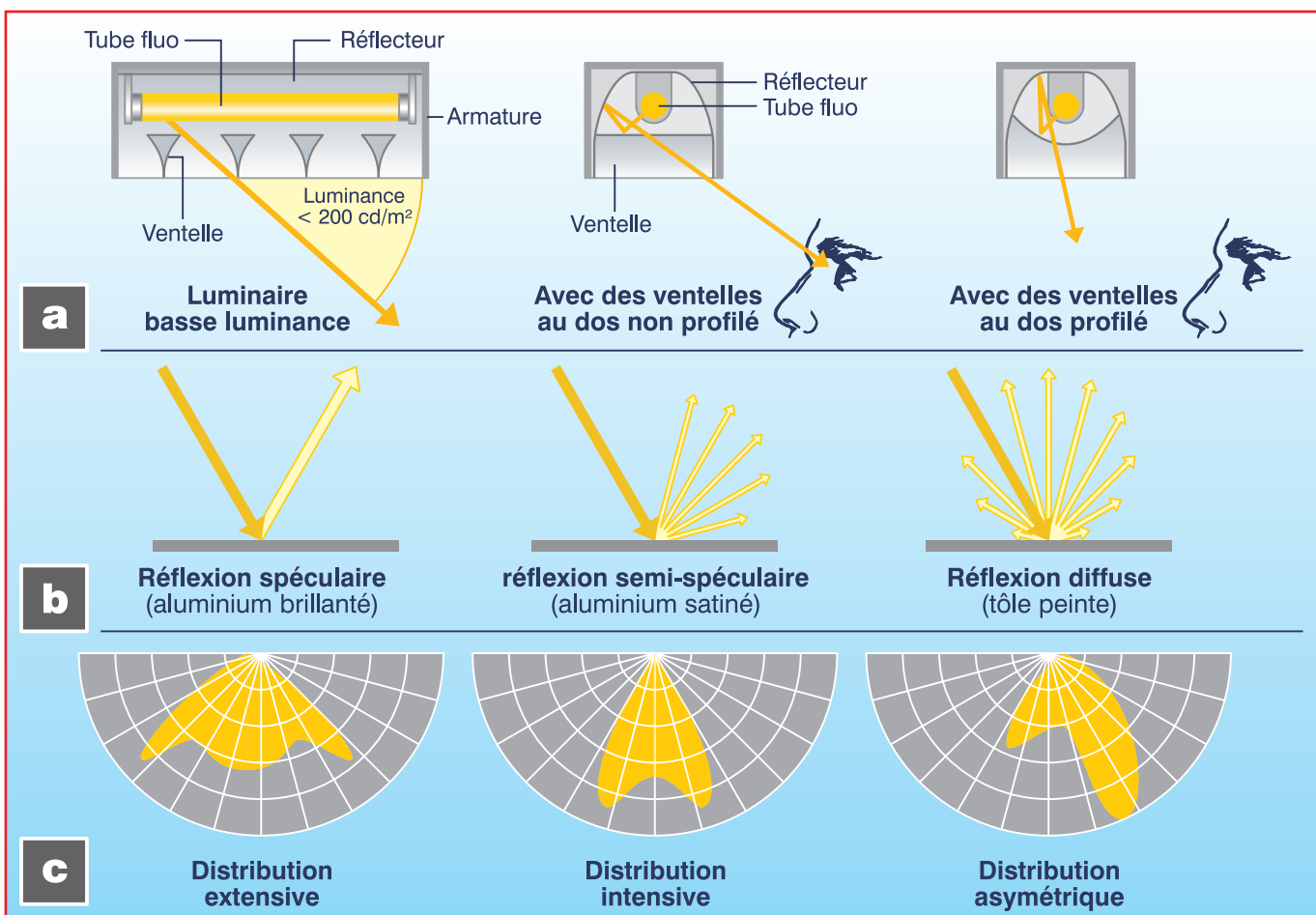
L'aluminium satiné masque les perturbations provenant de l'environnement et est moins sensible à l'encrassement. Cette solution est la plus intéressante dans la plupart des applications. Dans certaines situations, il faut cependant se méfier des luminances de crête.

L'aluminium martelé est surtout utilisé dans l'industrie car il est nettement moins sensible à l'encrassement que les deux matériaux cités ci-dessus.

Différentes caractéristiques permettent de classer et de comparer les luminaires entre-eux.



Luminances de crête. **1**



- 2** a : Influence de la forme des ventelles sur l'angle de défilement d'un luminaire.
 b : Les différents modes de réflexion.
 c : Les différentes distributions lumineuses des luminaires.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

La complémentarité naturel-artificiel - zonage de l'éclairage artificiel

Lorsqu'on réalise un zonage, les différentes parties du bâtiment peuvent être allumées sélectivement en fonction de l'éclairage naturel, de zones de même activité ou de même période d'occupation, selon le choix effectué.

Pour un local éclairé naturellement par une ouverture latérale, la distribution lumineuse dans la pièce est peu uniforme. On peut alors imaginer une subdivision de l'espace en zones d'éclairage distinctes selon leurs positions par rapport à la fenêtre, telles que les lampes d'une même zone soient gérées de la même manière mais puissent fournir un flux lumineux différent de celles situées dans les autres secteurs. Pour que ce système soit optimum, il est donc préférable de placer les luminaires parallèlement à la façade.

Le fait de créer un zonage de l'éclairage artificiel en fonction des apports de la lumière naturelle permet d'économiser de l'énergie en n'éclairant que les zones pour lesquelles l'éclairage naturel n'est pas suffisant. Ce zonage offre, en outre, la possibilité de ne pas éclairer certaines zones inoccupées, surtout en début et en fin de journée.

La figure 2b montre deux circuits d'éclairage artificiel : celui de gauche correspond à un zonage lié à la présence de lumière naturelle alors que celui de droite ne tient pas compte de cet apport d'énergie gratuite.

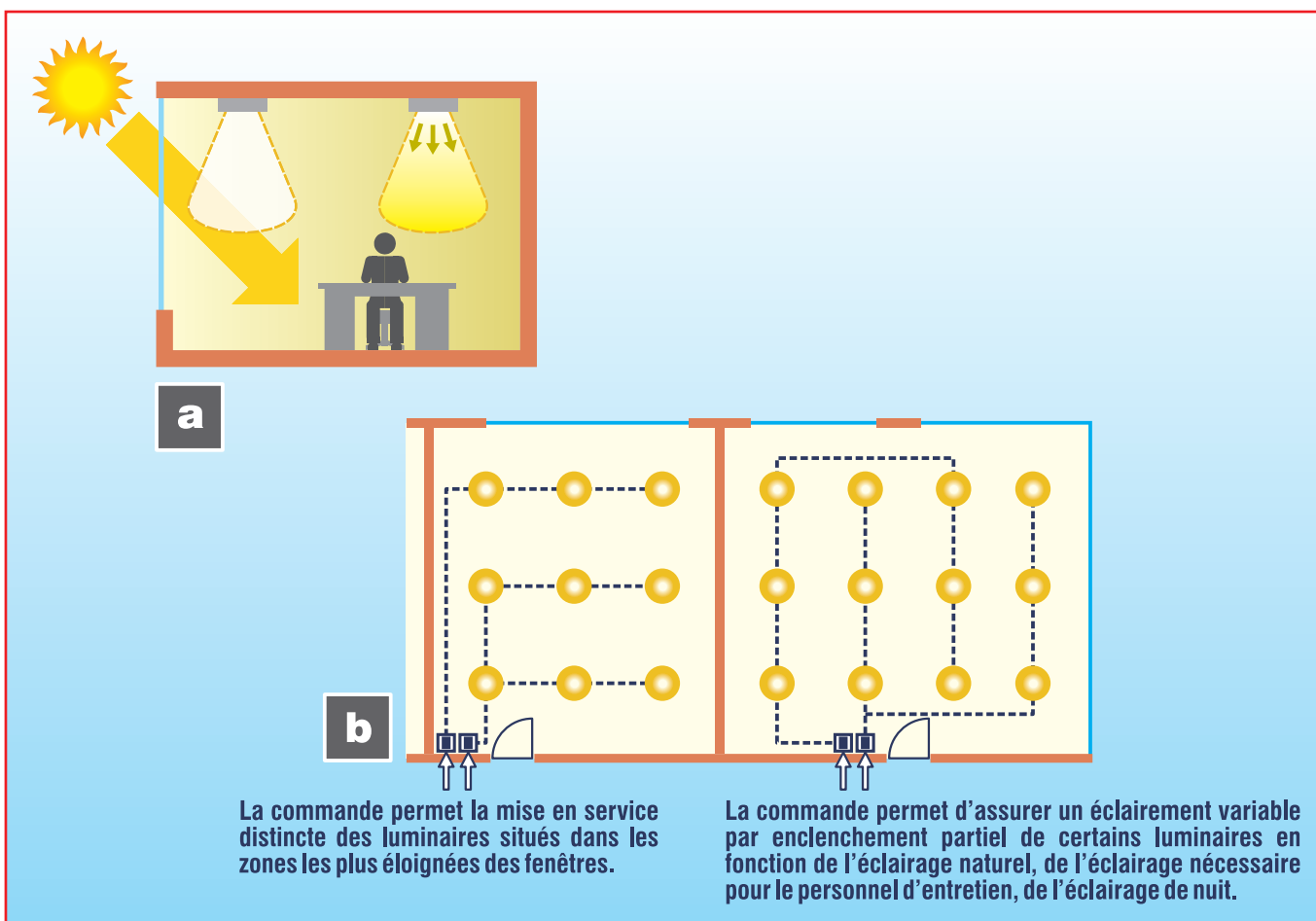
CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL
Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

La complémentarité naturel-artificiel - zonage de l'éclairage artificiel

Le zonage consiste à raccorder l'installation d'éclairage en plusieurs secteurs commutables séparément.



Exemple de zonage en fonction des disponibilités d'éclairage naturel. **1**



2 a : Principe de zonage en fonction des disponibilités d'éclairage naturel.
b : Division du circuit d'éclairage en deux circuits indépendants.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

La complémentarité naturel-artificiel - régulation de l'éclairage artificiel

Le contrôle du flux lumineux

Il y a deux manières de contrôler le flux lumineux d'une lampe. On peut soit utiliser un système On/Off traditionnel, qui peut cependant être appliqué à des groupes séparés de luminaires ou de lampes, permettant ainsi l'évolution de l'éclairage général sous forme de pas. Cette évolution est réalisée en allumant ou en éteignant les lampes par étapes successives (par exemple, une lampe sur deux). Le second moyen est le dimming, c'est-à-dire l'ajustement continu de l'éclairage artificiel qui peut être fait en fonction des apports extérieurs et qui permet également de doser précisément l'éclairage dans le but de créer des ambiances lumineuses particulières.

Il faut savoir qu'on ne peut pas réaliser de dimming avec tous les types de lampes et que le dimming des lampes à décharge nécessite toujours des ballasts électroniques dimmables.

Les horloges et minuteries

Dans les bâtiments où l'horaire de travail est fixe (immeubles de bureaux ou écoles), il est possible d'assurer, par zone ou pour l'ensemble du bâtiment, une commande d'allumage ou d'extinction de l'éclairage sur base de signaux horaires.

L'usage de minuteries assure l'extinction automatique de l'éclairage dans les locaux de circulation (escaliers, halls...) où la présence des utilisateurs est momentanée. L'éclairage, commandé par bouton poussoir, s'éteint après un temps réglable déterminé par la durée que l'utilisateur met pour parcourir la zone. Les minuteries sont peu à peu abandonnées au profit des détecteurs de présence.

Les détecteurs de présence

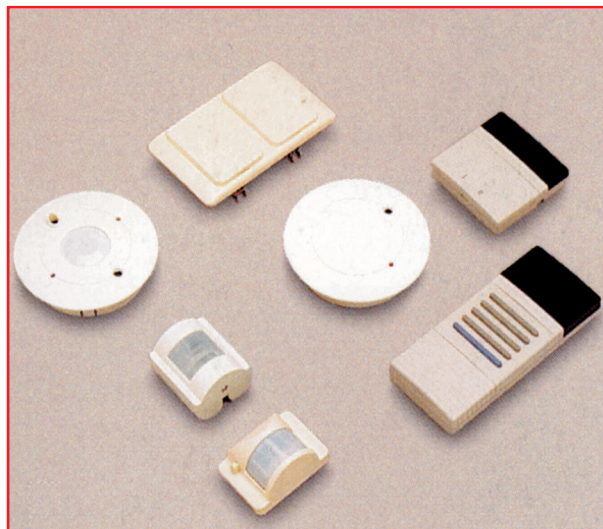
Le système de détection de présence est un système qui permet d'éclairer uniquement quand la pièce est occupée. Le détecteur de présence allume les appareils d'éclairage lors de l'entrée de l'occupant et les éteint quelque temps après sa sortie. Une temporisation à l'extinction est nécessaire pour ne pas réduire la durée de vie des lampes par des cycles d'allumage/extinction trop fréquents. Ainsi, une absence de 1 ou 2 minutes ne peut entraîner l'extinction des lampes.

Les cellules d'éclairément

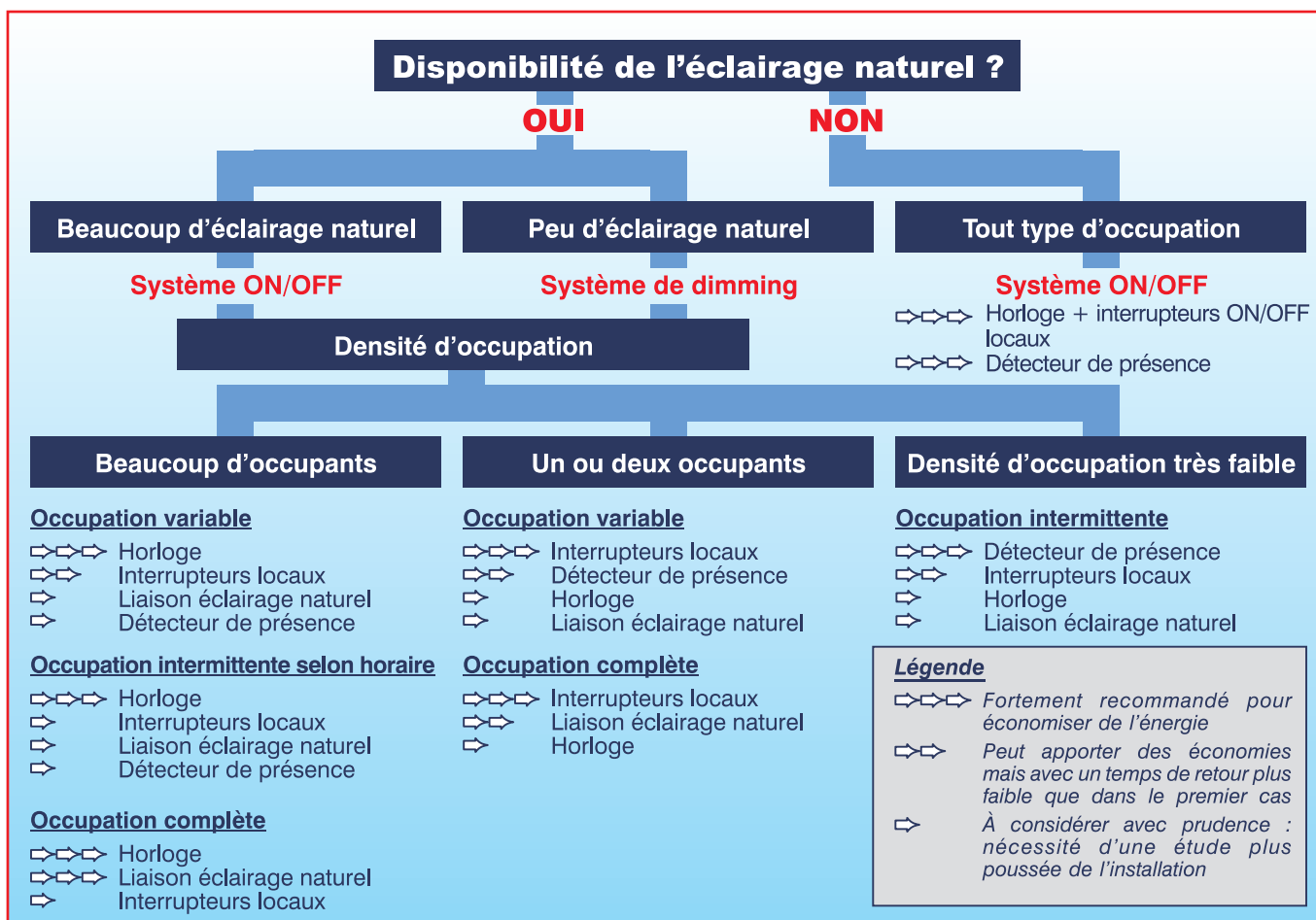
Très souvent, dans les zones proches des fenêtres, l'éclairage artificiel n'est nécessaire que le matin, le soir ou la nuit. Le reste de la journée, l'apport en éclairage naturel peut y être suffisant pour assurer le confort visuel.

Pour gérer l'éclairage artificiel en fonction de l'éclairage naturel disponible, on place une ou plusieurs cellules de mesure continue de l'éclairément soit à l'extérieur du local à gérer (sur la façade ou sur le toit), soit dans le local lui-même. On peut alors réaliser un réglage On/Off en fonction de l'éclairage extérieur mais la solution la plus intéressante est un dimming continu en fonction des apports extérieurs. Ce dimming peut être géré soit en fonction de la luminance extérieure de la fenêtre ou de la façade, soit en fonction de l'éclairément intérieur, soit en fonction d'une mesure de luminance au niveau de chaque luminaire.

Le contrôle du flux lumineux des lampes peut être réalisé suivant plusieurs modes de gestion :
la gestion horaire,
gestion en fonction de la présence et gestion en fonction des disponibilités d'éclairage naturel.



Différents systèmes de régulation de l'éclairage artificiel. **1**



2 Schéma décisionnel du type de gestion de l'éclairage artificiel.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

Les niveaux d'éclairage en fonction de l'activité et du type de local

Pour permettre aux personnes d'exécuter les tâches visuelles avec efficacité, précision et en toute sécurité, un éclairage adéquat et approprié doit être assuré. L'éclairage peut être fourni par la lumière du jour, l'éclairage artificiel ou une combinaison des deux.

Le niveau de visibilité et de confort requis dans un grand nombre de lieux de travail dépend du type et de la durée de l'activité.

Jusqu'à présent, chaque pays avait ses propres normes et recommandations en termes de valeur d'éclairage à respecter soit en fonction des types de locaux, soit en fonction du type d'activité.

Un des problèmes par rapport aux niveaux d'éclairage recommandés était la disparité quant au type d'éclairage. Il pouvait s'agir d'éclairages minimaux, d'éclairage de service, etc.

Une norme européenne (EN 12464) est en cours de réalisation et devrait être prochainement adoptée par la Commission. Elle spécifie les prescriptions pour les systèmes d'éclairage de la plupart des lieux de travail intérieurs et leurs zones associées en termes de quantité et de qualité de l'éclairage. Des recommandations sont données en termes d'éclairage moyen à maintenir. Elle détermine également les valeurs des indices de rendu des couleurs minimaux à satisfaire ainsi qu'un indice caractérisant l'éblouissement d'inconfort et de bonne pratique de l'éclairage.

Cette norme aborde l'éclairage des espaces communs et de circulation intérieurs, des espaces d'activité industrielle et des métiers, des bureaux, des magasins de vente, des lieux publics, des locaux scolaires, des établissements de santé et des lieux réservés aux transports. Cependant, les locaux sportifs ne sont pas abordés, excepté dans les bâtiments scolaires.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL
Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

Les niveaux d'éclairement en fonction de l'activité et du type de local

La valeur d'éclairement à atteindre dans un local est fonction de l'activité qui y est réalisée. Les normes reprennent les valeurs à atteindre en fonction du type de local et de la tâche qui y est réalisée.



L'appareil de mesure de l'éclairement est appelé "luxmètre". **1**

Bâtiments scolaires	Eclairement moyen à obtenir	Indice d'éblouissement	Indice de rendu des couleurs des lampes
<i>Type d'intérieur, tâche ou activité</i>	E_m	UGR_L	R_a
Salle de classe en primaire et secondaire	300	19	80
Salle de classe pour les cours du soir et enseignement adulte	500	19	80
Salles de conférence	500	19	80
Tableau noir	500	19	80
Table de démonstration	500	19	80
Salles d'art	500	19	80
Salles d'art dans les écoles des Beaux-Arts	750	19	90
Salles de dessin industriel	750	16	80
Salles de travaux pratiques et laboratoires	500	19	80
Salles de travail manuel	500	19	80
Ateliers d'enseignement	500	19	80
Salles de pratique musicale	300	19	80
Salles de pratique informatique	300	19	80
Laboratoires de langues	300	19	80
Ateliers et salles de préparation	500	22	80
Halls d'entrée	200	22	80
Zones de circulation, couloirs	100	25	80
Escaliers	150	25	80
Salles communes pour les étudiants et salles de réunion	200	22	80
Salles de professeurs	300	19	80
Bibliothèque : rayons de livres	200	19	80
Bibliothèque : zones de lecture	500	19	80
Réserves pour le matériel des professeurs	100	25	80
Hall de sports, gymnases, piscines	300	22	80
Cantines scolaires	200	22	80

2 Exemple de locaux repris dans la norme EN 12464.

La qualité de la lumière est une notion en pleine évolution : de nombreuses recherches actuelles traitent ce sujet. Elle est aussi complexe que la nature humaine et ne se limite en tout cas pas à une simple notion de quantité de lumière. La quantité appropriée de lumière contribue à atteindre une bonne qualité mais n'est pas le seul déterminant.

Une bonne qualité de lumière existe quand un système lumineux :

- crée des bonnes conditions de vision ;
- permet la réalisation de la tâche ;
- induit des interactions désirables et la communication ;
- contribue à une humeur appropriée à la situation ;
- n'induit pas d'effets néfastes sur la santé ;
- contribue à l'appréciation esthétique de l'espace.

La tâche des chercheurs en éclairage consiste à déterminer quelles sont les conditions lumineuses qui fournissent une bonne qualité de lumière. Il apparaît assez clairement qu'il n'existe pas de réponse universelle à ce problème car la solution sera influencée par le type de tâche, la configuration et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière est influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.

Les différents critères qui pourraient avoir une influence sur la qualité de la lumière sont :

- la luminance et sa distribution ;
- l'éclairement et son uniformité ;
- l'éblouissement ;
- le taux de clignotement des lampes (également appelé flickering) ;
- la distribution spectrale de la lumière ;
- la présence et l'utilisation de l'éclairage naturel ;
- le pourcentage d'éclairage indirect par rapport à l'éclairage direct ;
- la possibilité de contrôle individuel de l'ambiance lumineuse.

La qualité de la lumière peut être définie comme le degré selon lequel l'environnement lumineux répond aux demandes des personnes occupant l'espace.



La qualité de la lumière est aussi complexe que la nature humaine elle-même. **1**

La luminance et sa distribution

L'éclairage et son uniformité

L'éblouissement

Le taux de clignotement des lampes

La distribution spectrale de la lumière

La présence et l'utilisation de l'éclairage naturel

Le pourcentage d'éclairage indirect par rapport à l'éclairage direct

La possibilité de contrôle individuel de l'ambiance lumineuse

2 Les différents paramètres agissant sur la qualité de la lumière.

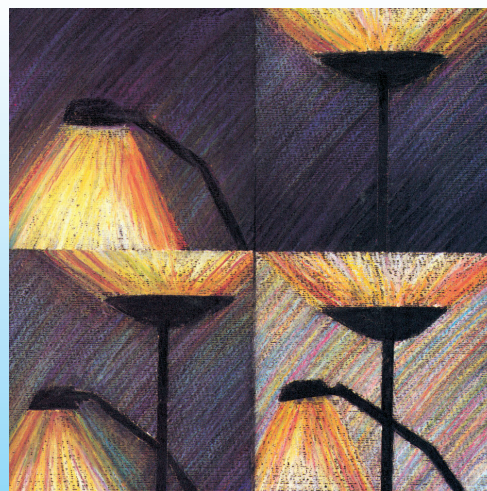
L'éclairage direct (figure 2a) implique la projection de la lumière, directement de la source ou du luminaire, sur la surface de travail. C'est le mode d'éclairage le plus répandu depuis le développement des tubes fluorescents. Les luminaires sont habituellement répartis uniformément au plafond et fournissent un éclairage général. L'avantage de ce mode d'éclairage est que la plus grande partie de la lumière n'est pas réfléchi avant d'atteindre la tâche à éclairer et que le rendement du système est meilleur que celui de tout système comprenant une partie indirecte. L'inconvénient de ce genre de système provient des risques importants d'éblouissement et d'une répartition des luminances très irrégulière et, de ce fait, assez éloignée des caractéristiques de la lumière naturelle.

L'éclairage indirect (figure 2b) consiste à utiliser une surface, généralement le plafond, et parfois les murs, comme réflecteur pour diffuser la lumière. L'avantage de ce mode d'éclairage est une bonne protection contre l'éblouissement, du fait de la diffusion de la lumière par le plafond (pas d'éblouissement direct) et une répartition uniforme des luminances. L'inconvénient principal provient du fait que l'éclairage dépend fortement des coefficients de réflexion de la ou des parois sur lesquelles la lumière est réfléchi et que, comme la lumière est réfléchi une fois avant d'atteindre la tâche à éclairer, ce mode d'éclairage a un moins bon rendement que le précédent. Il faut de plus veiller à ne pas utiliser des sources trop lumineuses qui pourraient rendre le plafond éblouissant. Ce type d'éclairage ne produit pas d'ombre. Il peut donc être monotone et rendre difficile la perception d'objets tridimensionnels. Les luminaires sont, par leur disposition, fortement soumis aux poussières et autres saletés (insectes morts...).

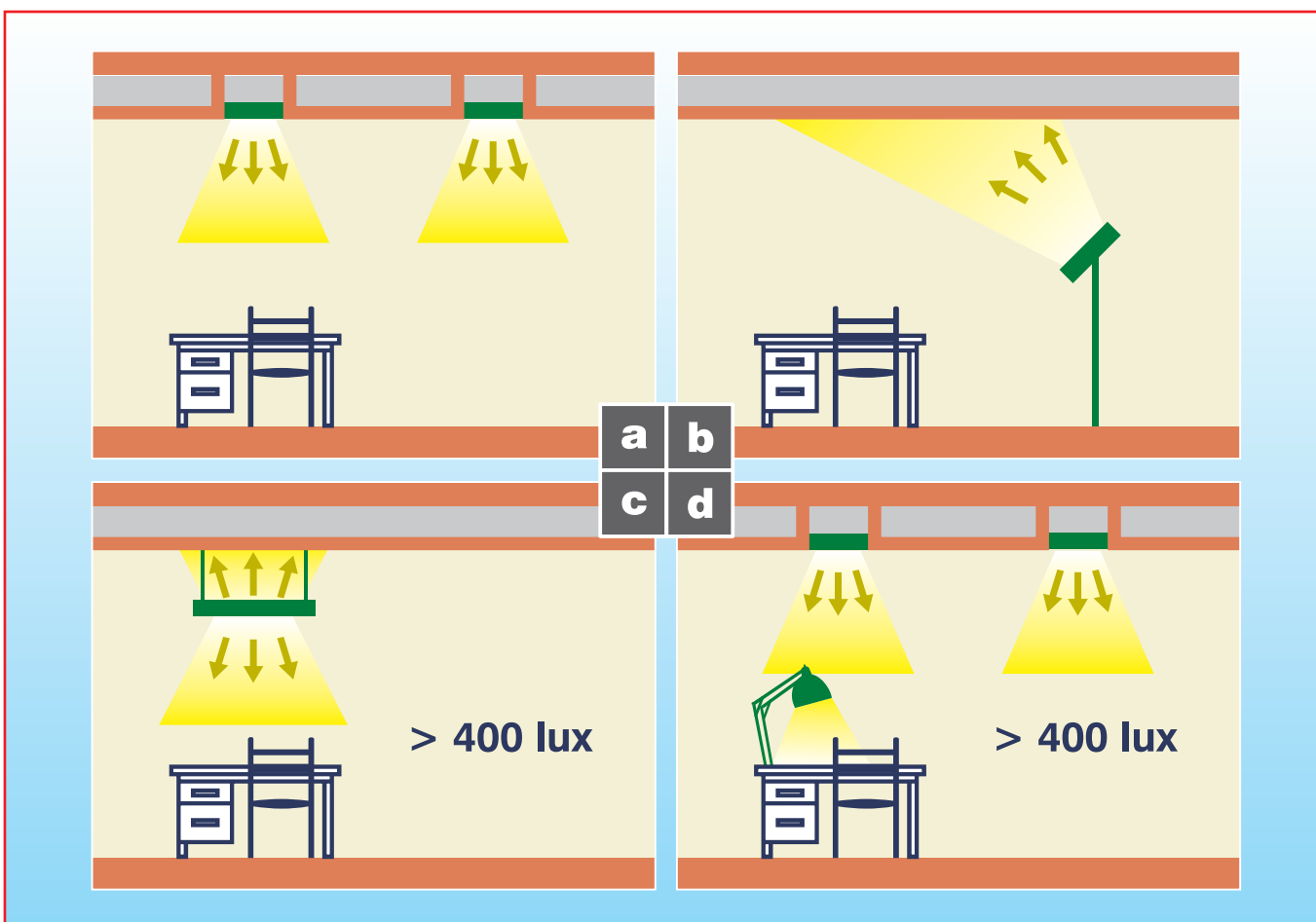
L'éclairage direct/indirect (figure 2c) est similaire au mode indirect mais se distingue par le fait qu'une partie de la lumière est aussi projetée sur le plan de travail. La partie indirecte reste toutefois dominante. Il existe des luminaires qui permettent d'utiliser une même source pour produire l'éclairage indirect et direct. D'autres luminaires utilisent deux sources distinctes avec commandes séparées. Les avantages de ce mode d'éclairage sont identiques à ceux de l'éclairage indirect. En plus, la partie directe crée des ombres avantageuses et permet de réduire la luminance du plafond. L'inconvénient principal de ce genre d'éclairage est que son rendement est très sensible aux coefficients de réflexion des parois, mais ce point est moins marqué que pour l'éclairage indirect car une partie de l'éclairage est dirigée directement vers le plan de travail.

L'éclairage à deux composantes (figure 2d) est composé d'une première composante qui assure un éclairage général direct ou indirect de faible valeur (environ 300 lux sur le plan de travail) et d'une deuxième composante qui assure l'appoint directement sur le plan de travail. Les contrastes entre la surface de travail horizontale et les parois ne doivent pas être excessifs, afin de ne pas fatiguer visuellement les utilisateurs. L'avantage de ce type d'éclairage est que le faible niveau d'éclairage général permet d'obtenir de substantielles économies d'énergie. L'enclenchement des sources d'éclairage ponctuelles en fonction des besoins garantit des économies supplémentaires. L'inconvénient de l'éclairage ponctuel est qu'il peut générer des contrastes importants et des ombres marquées ainsi que des réflexions gênantes.

Il existe différents systèmes d'éclairage artificiel qui influencent directement la répartition de la lumière dans le local. Il s'agit de l'éclairage direct, indirect, direct/indirect et à deux composantes.



L'éclairage artificiel peut être direct, indirect ou à deux composantes. **1**



2 a : L'éclairage direct.
c : L'éclairage direct/indirect.

b : L'éclairage indirect.
d : L'éclairage à deux composantes.

La partie de la fenêtre qui participe le plus à l'éclairage naturel du local est la partie supérieure. Une surface vitrée située en dessous du plan de travail n'a aucun intérêt en termes d'éclairage naturel. Il n'est donc pas utile de vitrer l'entièreté de la façade.

Dans les bureaux, il convient de favoriser la réflexion de l'éclairage naturel en utilisant des parois les plus claires possibles et en positionnant le mobilier de manière à limiter les obstructions formées par celui-ci.

Il est fondamental de prévoir des protections solaires pour les orientations sud, est et ouest. Dans certains cas, les orientations nord peuvent également en nécessiter. La situation idéale, au point de vue thermique et visuel, est la combinaison de protections solaires extérieures et intérieures gérées en fonction des saisons.

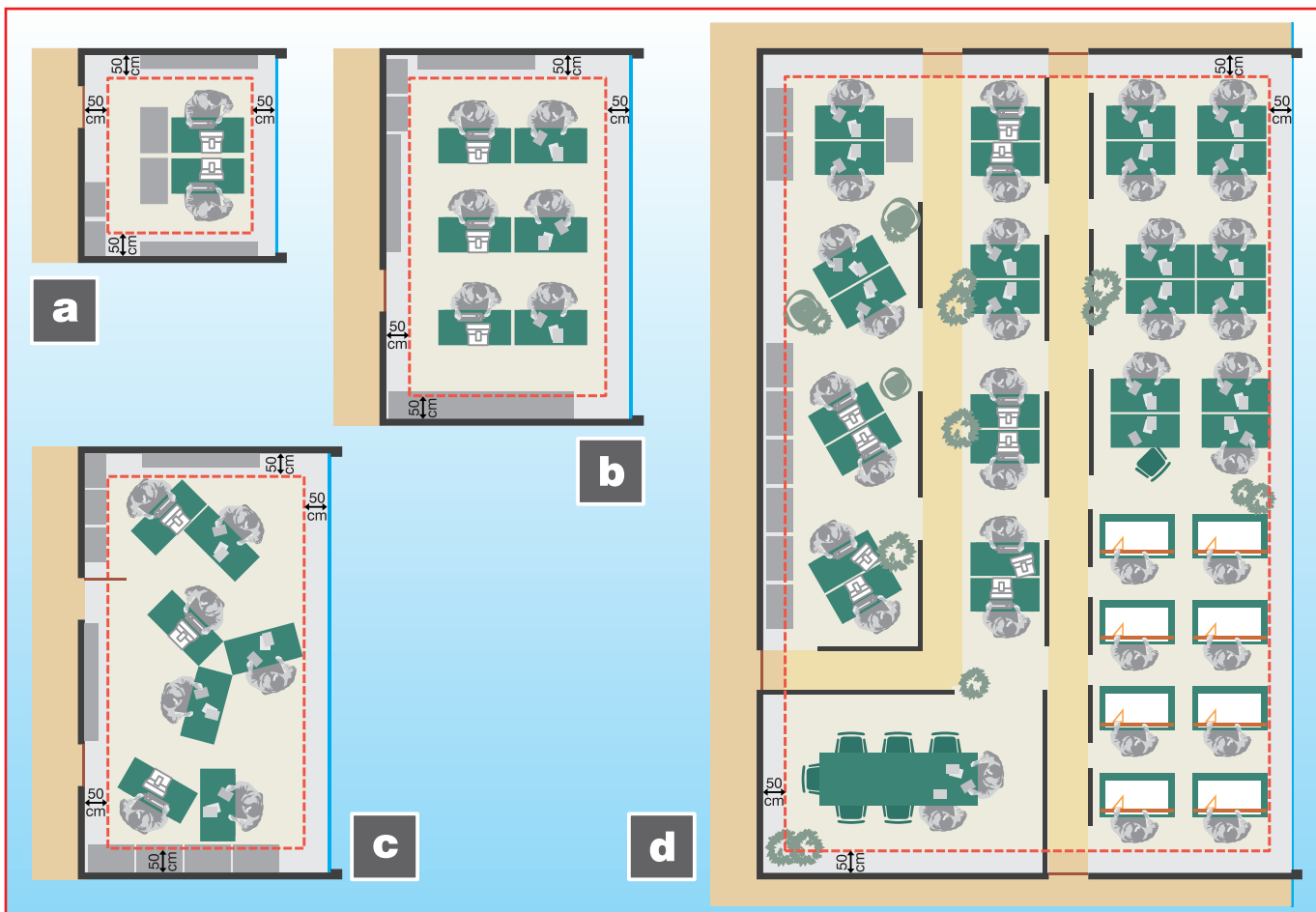
La conception de locaux de bureaux en termes d'éclairage naturel dépendra du type de bureau considéré. En effet, le terme de " bureau " englobe plusieurs types de locaux :

- les bureaux individuels (figure 2a) ont en général une faible profondeur. Les occupants jouissent d'une grande disponibilité d'éclairage naturel. Les bureaux devront donc être placés perpendiculairement aux fenêtres, le plus près possible de celles-ci ;
- les bureaux de groupes (figure 2b) rassemblent 5 à 10 personnes qui ne doivent pas interagir entre elles. Les bureaux peuvent donc être alignés perpendiculairement aux fenêtres, de manière à ce que la lumière provienne de gauche pour les droitiers ou de droite pour les gauchers ;
- les bureaux d'équipes (figure 2c) répondent à un besoin de contact, de communication et de flexibilité des membres d'une équipe. Il y est difficile d'obtenir un éclairage de qualité pour tous, car la direction de vision ainsi que la disponibilité d'éclairage naturel sont différentes pour chaque personne. La plus grande difficulté est de limiter les problèmes d'éblouissement, que ce soit par l'éclairage naturel ou par l'éclairage artificiel ;
- les bureaux paysagers (figure 2d) sont en général très profonds. Il faut donc les éclairer de manière multilatérale et positionner le mobilier de manière à créer le moins d'obstructions possible. Il convient également de grouper les activités selon leurs besoins en éclairage et de placer les tâches les plus demandeuses auprès des fenêtres. Il est également primordial de zoner l'éclairage artificiel de manière à limiter les consommations.

Il est essentiel de limiter la profondeur des locaux de bureaux, de veiller à la clarté des parois et à la position du mobilier.



EOS building à Lausanne (Suisse) **1**
(arch. Richler & Dahl Roche).



2 a : Organisation des bureaux individuels.
c : Organisation des bureaux d'équipes.

b : Organisation des bureaux de groupe.
d : Organisation des bureaux paysagers.

L'intégration de l'éclairage naturel dans les logements a un but différent de celle des bureaux. Pour les bureaux, on recherche un éclairage fonctionnel et efficace. Dans les habitations, l'éclairage naturel participe plus à l'ambiance et peut être différent selon les envies des habitants. Cependant, il est important de concevoir la maison ou l'immeuble de façon à ce que tous les espaces de vie se trouvent à proximité des fenêtres. Voici quelques conseils généraux qui permettent d'améliorer les disponibilités d'éclairage naturel dans les logements :

Il convient d'ouvrir largement les cuisines, coins repas, pièces de séjour. Ce sont les pièces de vie de la maison, nous y passons 80 % de notre temps durant le jour (1).

Il est très important de prévoir un espace bien éclairé dans chaque chambre afin de favoriser l'épanouissement des enfants. Des premiers jeux de bébé à l'apprentissage de la lecture ou l'accomplissement des devoirs, la lumière naturelle doit accompagner le développement psychomoteur de l'enfant (2).

On privilégiera autant que possible l'éclairage bilatéral. La présence d'ouvertures sur deux façades opposées équilibre les niveaux d'éclairement et atténue les ombres portées (3).

De même, l'utilisation de portes ou d'impostes de portes vitrées permettra de profiter au maximum des possibilités de second jour (4).

Les locaux du dernier étage pourront être éclairés depuis la toiture, mais il ne faut pas oublier l'importance d'une vue directe vers l'extérieur (et non uniquement vers le ciel). On combinera donc les ouvertures zénithales avec des ouvertures latérales quand c'est possible (5).

Les puits de lumière sont des solutions très intéressantes pour éclairer les locaux centraux des logements, en général utilisés comme locaux de service (6).

Il faut penser à éclairer naturellement les combles et les sous-sols : la création d'ouvertures, même de petites tailles, permet de s'orienter et de se déplacer dans ces espaces en toute sécurité (7).

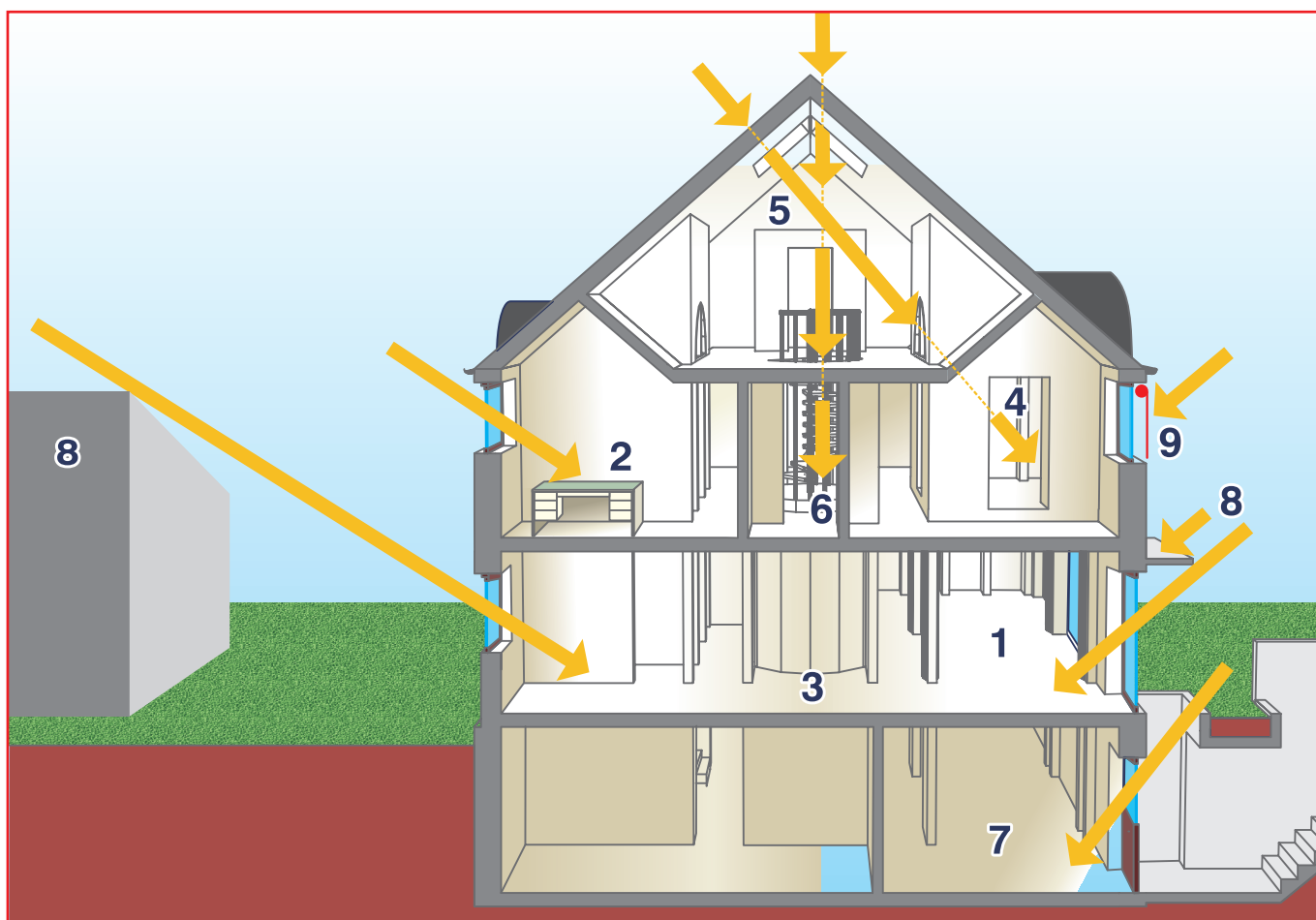
Il ne faut pas oublier de tenir compte de l'environnement extérieur : les avant-toits et balcons ainsi que les bâtiments voisins peuvent réduire fortement les pénétrations de lumière naturelle (8).

Il est important de tirer profit de chaque orientation et de prévoir des protections solaires dès la conception du bâtiment (9).

La clarté des espaces, les transparences, le jeu des couleurs, et même l'intimité créée par les ombres, doivent accompagner et favoriser la multitude d'activités qui caractérisent notre vie quotidienne.



Maison PLEIADE, Louvain-La-Neuve **1**
(arch : P. Jaspard).



2 Concepts d'éclairage naturel d'une maison individuelle.

L'apport d'éclairage naturel est essentiel dans les hôpitaux, plus particulièrement dans les chambres et dans les services de soins intensifs. Même si on ne peut pas encore quantifier l'impact de l'éclairage naturel sur la santé, les chercheurs s'accordent à dire qu'il est positif. Les patients immobilisés, qui passent 24 heures sur 24 dans le même environnement doivent pouvoir profiter du plus d'éclairage naturel possible.

Des études scientifiques ont également montré que la vue vers l'extérieur peut avoir des effets positifs sur la santé des patients. Plus particulièrement, pour des patients en phase post-opératoire, il apparaît que la vue de la nature est particulièrement intéressante. Mais cela ne veut pas dire qu'il faut toujours privilégier une vue vers des espaces verts : pour d'autres types de patients, d'autres types de vue peuvent peut-être être plus satisfaisantes.

Les fenêtres doivent être dimensionnées de manière à permettre la vue depuis le ou les lits, dans une position couchée. Un système d'ombrage efficace doit être présent, de manière à ce que les patients ne soient pas sans cesse éblouis, ce qui les conduirait à se passer totalement d'éclairage naturel. Il faut également prévoir un système d'occultations qui permet d'assurer l'intimité des patients.

L'éclairage naturel ne devrait pas être utilisé dans les endroits où l'éclairage général doit être constant, comme les laboratoires spécialisés, les salles d'opérations ou de radiologie.

L'utilisation d'éclairage naturel dans les couloirs est également intéressant et permet de diminuer fortement les consommations d'énergie car ceux-ci devraient être constamment éclairés artificiellement s'ils ne peuvent pas profiter de lumière naturelle.

L'impact bénéfique de la lumière naturelle sur la santé ainsi que l'effet positif d'une vue extérieure pour les patients poussent à la promotion de l'éclairage naturel dans les hôpitaux.



L'apport d'éclairage naturel est essentiel **1** pour les personnes hospitalisées ou séjournant en maisons de retraite.



a

b



2 a : Système d'ombrage protégeant les patients de l'éblouissement.
b : Vue extérieure apaisante.

De nombreuses études ont montré l'importance de la présence d'éclairage naturel pour la réussite scolaire des enfants, leur développement ainsi que leur santé.

Les deux points les plus importants en ce qui concerne l'éclairage naturel des écoles sont les suivants :

- il faut veiller à prévoir des surfaces vitrées assez importantes pour laisser pénétrer suffisamment de lumière du jour de manière à atteindre des niveaux d'éclairage acceptables, tout en favorisant une distribution homogène de la lumière ;
- il faut également porter une attention particulière aux problèmes d'éblouissement.

En général, la majorité des élèves étant droitiers, les ouvertures doivent en majorité être situées sur la gauche des salles de classe, de manière à ne pas créer d'ombres gênantes pour les enfants qui écrivent. La solution idéale est de privilégier l'éclairage multilatéral afin ne pas défavoriser les élèves se trouvant le plus loin des fenêtres.

L'éclairage du tableau est critique, qu'il soit naturel ou artificiel. Celui-ci ne doit pas se trouver trop près des ouvertures, de manière à limiter les reflets. Les bureaux situés au premier rang, du côté opposé aux ouvertures, sont plus sensibles à ce phénomène.

En plus des protections solaires destinées à lutter contre l'éblouissement, il faut veiller à la possibilité d'occulter complètement les ouvertures. Il faut également veiller à prévoir suffisamment de parois opaques pouvant faire office de tableaux d'affichage.

Stratégies à appliquer en fonction de la typologie des bâtiments

Il existe de nombreuses typologies d'écoles différentes. La manière de capter l'éclairage naturel va varier en fonction de celles-ci.

Les bâtiments profonds (en plan) devront favoriser l'usage d'ouvertures zénithales et de puits de lumière. Ce type de bâtiment peut s'avérer désastreux en termes d'éclairage naturel s'il est composé de plusieurs étages.

Les bâtiments présentant une cour intérieure sont des alternatives très intéressantes aux bâtiments profonds car ils favorisent l'éclairage multilatéral. L'usage de matériaux transparents ou translucides permet de protéger tout ou une partie de la cour pour créer un espace de détente utilisable par tout temps.

Les écoles de forme linéaire ont un grand avantage à être orientées selon un axe est-ouest. Les plus grandes façades sont alors orientées nord et sud, ces orientations permettant plus facilement la protection contre l'éblouissement et les surchauffes en été.

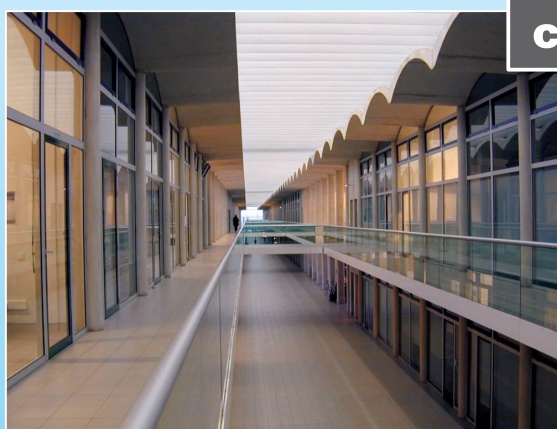
Les écoles de forme "composite" doivent suivre les mêmes principes que ceux exposés ci-dessus : on privilégiera les orientations nord et sud, les ouvertures zénithales ou les cours et atrium pour fournir de la lumière aux espaces profonds.

Pour profiter au maximum des possibilités d'économies d'énergie dues à l'utilisation de l'éclairage naturel, l'éclairage artificiel doit être géré en fonction de celui-ci. Les systèmes d'horloge et les détecteurs de présence sont très intéressants dans ce type de bâtiment.

**La prise en compte
de l'éclairage naturel
lors de la conception
d'une école est
primordiale.**



1 L'éclairage naturel agit sur le développement, la santé et la réussite scolaire des enfants.



2 a : École des gardes forestiers à Lyss (Suisse) (arch. Itten et Brechbühl)
b : École des gardes forestiers à Lyss (Suisse) (arch. Itten et Brechbühl)
c : Lycée Albert Camus de Fréjus (France) (arch. Sir Norman Foster)
d : Lycée Léonard de Vinci à Calais (France) (Arch. Isabelle Colas)

L'éclairage d'un hall de sport est assez difficile à concevoir. Des petits projectiles doivent être suivis par les yeux à très haute vitesse. Pour les sports qui demandent des déplacements rapides, une uniformité d'éclairage est importante car les yeux n'ont pas le temps de s'ajuster à un niveau d'éclairage variable dans les différents endroits du hall. L'éblouissement est également un problème particulier car des sources de forte luminosité sont distrayantes et peuvent être la cause de la perte de vue de l'objet qui les traverse. Dans les cas extrêmes, elles peuvent même devenir inconfortables.

Le tableau 1, fourni par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) donne les valeurs d'éclairage à atteindre (à 1 m au-dessus du sol) selon le type de sport, lors de l'entraînement ou en compétition. Selon la CIE, les ouvertures devraient procurer ces valeurs d'éclairage durant une proportion significative du temps d'utilisation du hall.

Dans les halls de sports, il est essentiel d'éviter le rayonnement direct afin d'éviter les problèmes de surchauffe et d'éblouissement. Il faut donc favoriser les ouvertures orientées au nord et prévoir des protections solaires. Il faut également encourager un éclairage multilatéral afin d'uniformiser l'éclairage de la salle : ce dernier point est impératif.

Le contact visuel avec l'extérieur est désirable et peut être obtenu par l'utilisation de fenêtres latérales. Leur allège ne doit pas se situer à plus d'un mètre du sol et le haut de la fenêtre ne peut pas dépasser deux mètres cinquante du sol.

Le hall sportif de Vrin (Suisse) conçu par Gion A. Caminada est un exemple intéressant en termes d'éclairage naturel (figures 2a et 2b). Ce hall est éclairé bi-latéralement par des fenêtres situées en hauteur, ce qui permet de profiter de grandes surfaces de mur pour les espaliers ou pour les espaces de rangements. Ceux-ci sont en effet tous intégrés dans les parois latérales. Le bâtiment est orienté selon un axe est-ouest. Les fenêtres de contact avec l'extérieur sont situées sur la petite façade, orientée à l'ouest. Toutes les fenêtres sont équipées de protections solaires intérieures.

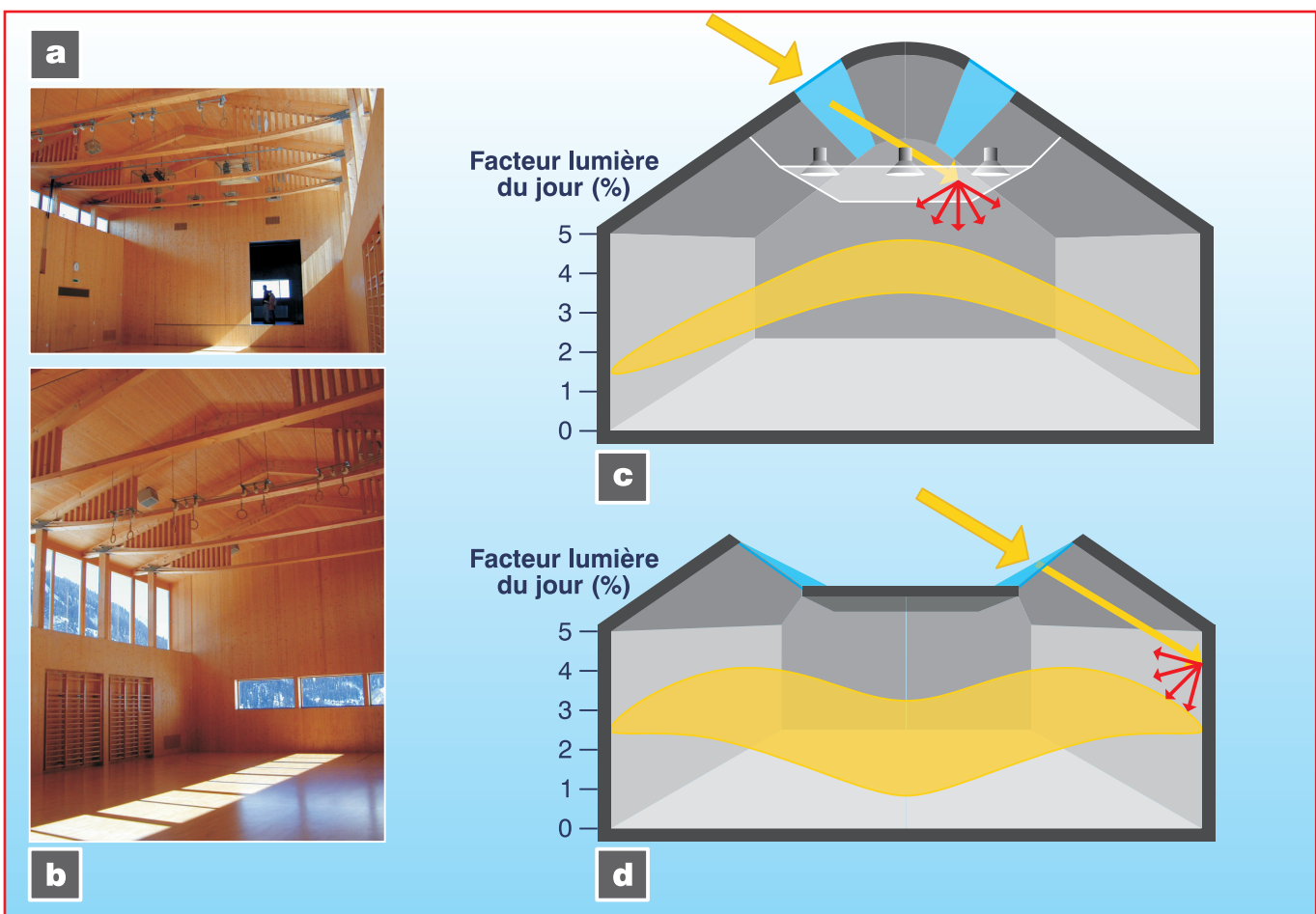
Le schéma 2c illustre le hall sportif de la "Brune Park school", conçu par l'architecte Jackson Greenen Down & Partner. Ce hall est éclairé par deux bandeaux zénithaux en dessous desquels on a tendu une toile diffusante qui donne une très grande uniformité d'éclairage dans le hall. L'éclairage artificiel est également placé entre la toile et le plafond de la salle.

Le schéma 2d illustre, pour sa part, le hall sportif de l'école de Mountbatten (Jackson Greenen Down & Partner and MR D. Poole) qui est éclairé zénithalement par des sheds combinés avec des murs peints en blanc mat.

Une intégration intelligente de l'éclairage naturel dans les halls de sports permet de diminuer fortement les consommations d'éclairage artificiel tout en protégeant les sportifs d'éventuels problèmes d'éblouissement.

Type de sport	Loisir / Entraînement E_h en lux	Compétition E_h en lux
Basket-ball, football, judo, acrobaties, gymnastique, handball, athlétisme, patinage, danse, volley-ball, hockey, cyclisme	300	500
Badminton, escrime, tennis, tennis de table	500	750
Boxe, lutte	300	1500 - 3000

Valeurs d'éclairage à atteindre selon le type de sport, lors d'entraînement ou de compétition (CIE). **1**



2 a et b : Hall sportif de Vrin, Suisse (arch. Gion A. Caminada).
c : Brune Park school (arch. Jackson Greenen Down & Partner).
d : Hall sportif de l'école de Mountbatten (arch. Jackson Greenen Down & Partner).

Les opérations de contrôle de qualité et d'aspect font appel à l'œil humain pour discerner d'infimes variations de couleur et de texture. La qualité de la lumière naturelle et notamment sa capacité à rendre fidèlement les couleurs est très intéressante.

Les halls industriels sont en général des bâtiments très larges et très profonds qui ont deux caractéristiques principales leur donnant une certaine particularité par rapport à la lumière naturelle : ils ont souvent une hauteur sous plafond importante et ne font en général qu'un étage de haut.

Ce type de bâtiment se prête donc bien à l'utilisation de l'éclairage naturel zénithal ou latéral en hauteur. Les ouvertures zénithales sont en effet très avantageuses quand les murs périphériques du bâtiment doivent être utilisés, quand les ouvertures latérales sont inappropriées pour des questions de secret, de sécurité, lorsque la vue vers l'extérieur est inappropriée ou quand des variations de lumière dans les directions de vision des occupants peuvent s'avérer néfastes, voir dangereuses. En général, on déconseille les pénétrations de lumière directe car les éblouissements directs et les reflets possibles sur des surfaces métalliques réduisent la performance et peuvent mettre en cause la sécurité du personnel, notamment lors de travail sur machines. Il est conseillé de privilégier la lumière diffuse et de réduire les ombres portées, toujours pour des questions de sécurité.

Les ouvertures de type sheds, orientées au nord s'appliquent bien à ce genre d'application car elles laissent pénétrer la lumière diffuse du ciel tout en protégeant le bâtiment des surchauffes liées à la pénétration directe de soleil.

La figure 2a montre la distribution de la lumière dans un local équipé de sheds. Les trois courbes correspondent à un ciel clair avec soleil, lorsque le soleil fait face à l'ouverture (courbe 1), à un ciel couvert (courbe 2) et à un ciel clair avec soleil, lorsque le soleil est en position opposée à l'ouverture (courbe 3).

La figure 2b montre l'impact de la densité d'ouvertures sur la distribution et la quantité d'éclairage dans le local. Logiquement, plus les ouvertures sont rapprochées, plus il y a de surfaces vitrées et donc plus le niveau d'éclairage est important. L'uniformité est également meilleure lorsqu'il y a de nombreuses ouvertures.

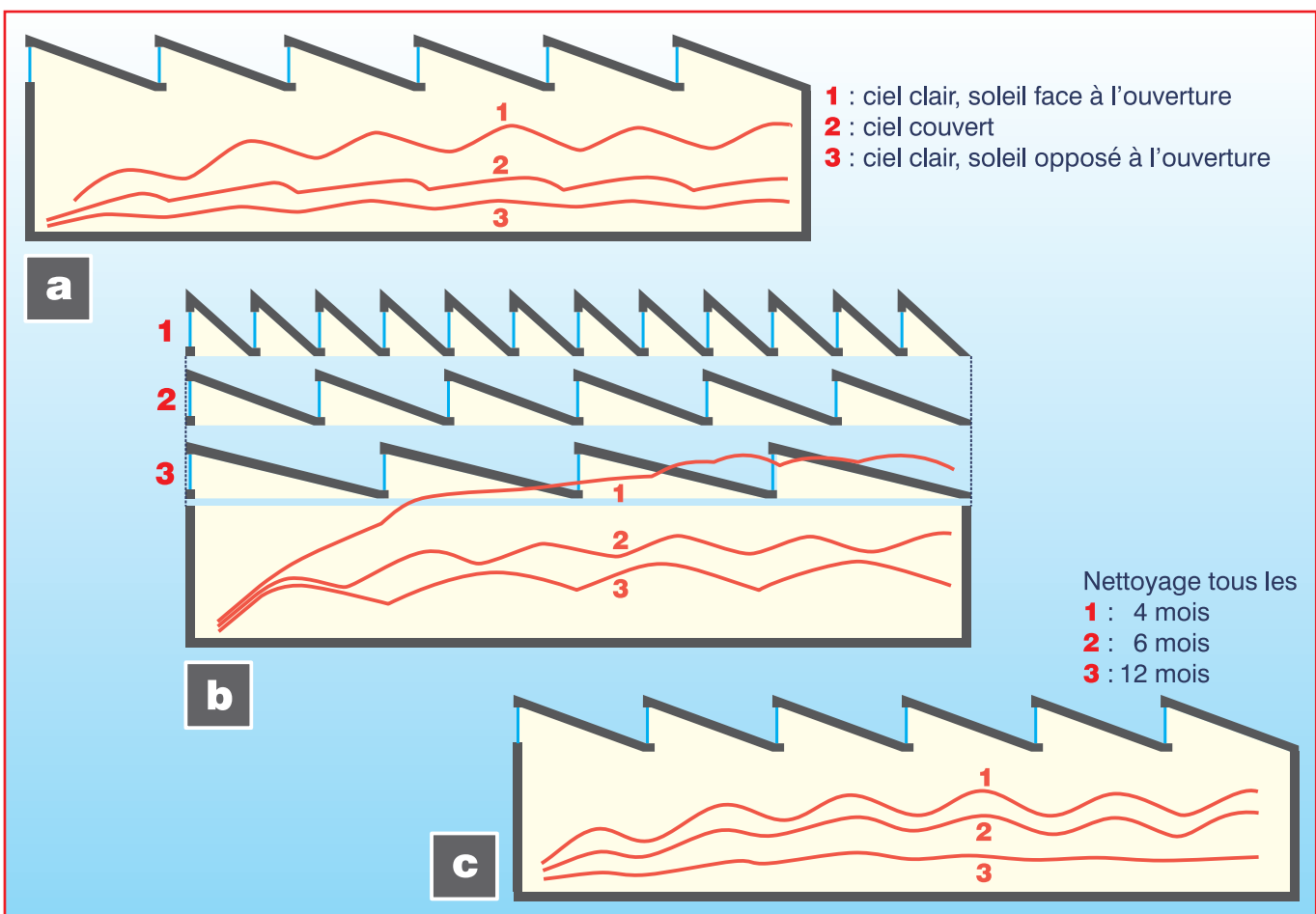
De part leur environnement extérieur et intérieur, les halls industriels sont généralement soumis à des conditions environnementales plus rudes que les immeubles du tertiaire, par exemple. Les vitrages seront donc très rapidement sales. L'impact du degré de salissement des vitrages sur l'éclairage du local est représenté graphiquement à la figure 2c. La courbe 1 est obtenue pour une fréquence de nettoyage de 4 mois, la courbe 2 correspond à un nettoyage tous les 6 mois et la courbe 3, tous les 12 mois.

Pour les ouvertures zénithales horizontales, l'influence de la fréquence de nettoyage des vitrages est encore plus importante car les vitrages se salissent beaucoup plus rapidement.

Les tâches accomplies dans l'industrie sont nombreuses et variées. L'éclairage naturel est particulièrement intéressant pour certaines de celles-ci, notamment dans l'industrie textile ou agro-alimentaire.



Centre de secours de Mont-de-Marsan (France) (arch. C. et J-F. Bats).



2 a : Distribution de la lumière en fonction du type de ciel.
b : Impact de la densité d'ouverture sur l'éclairage intérieur.
c : Impact du degré de salissement des vitrages sur l'éclairage intérieur.

Pour comprendre l'émergence du souci de développement durable dans l'urbanisme, il faut tout d'abord appréhender le contexte (physique et théorique) dans lequel ces préoccupations sont apparues. En effet, l'aménagement urbain est une pratique qui agit sur un "milieu", qu'il n'est pas inutile de tenter de décrire et de définir, avant de penser à le transformer.

On peut dire que la croissance urbaine est le phénomène le plus marquant de l'évolution des territoires depuis la révolution industrielle et ce, à peu près partout dans le monde. Les "métropoles" - engendrées par la concentration de la production économique dans les villes, par la poussée démographique, la mécanisation de l'agriculture, etc. - fascinent depuis longtemps : déjà en 1895, le poète Émile Verhaeren décrivait "les campagnes hallucinées" par "les villes tentaculaires". En 2000, 48 % de la population mondiale vit dans les villes. Il y a aujourd'hui 19 villes dans le monde qui dépassent les 10 millions d'habitants, alors qu'il n'y en avait encore que 6 en 1980.

Mais la taille d'une ville mesurée en habitants ou en hectares est très différente. Entre 1970 et 1990, la surface urbanisée autour de Chicago s'est accrue de 46 %, tandis que sa population n'a augmenté que de 4 %. En Île-de-France, entre 1990 et 1999, la population n'a cru que de 0,3 %, tandis qu'on a urbanisé jusqu'à 2 000 hectares, annuellement¹. À l'échelle d'une ville, sa délimitation-définition est donc une question en soi. Que faut-il considérer : un certain taux de densité d'habitants, ou de bâtiments, un territoire d'activités non agricoles, un "bassin" de navetteurs drainé par les emplois en ville ? Ainsi, la région urbaine de Bruxelles, définie par l'Institut National de Statistique, recouvre 54 communes et une superficie de 1 614 km², alors que la région bruxelloise administrative ne compte que 19 communes, pour 161 km².

Enfin, toute ville s'appréhende aujourd'hui en réseau, dans un tissu de communications et de polarisations, économiques et politiques. Si des territoires comme les Pays-Bas, le Nord de l'Italie, les Flandres, connaissent la polycentralité urbaine depuis le Moyen Âge, même les grandes capitales tissent aujourd'hui par dessus leurs frontières des relations avec d'autres "villes globales"² ; ce qui remet en cause les liens traditionnels entre une ville et son territoire, qui organisaient jusqu'ici la redistribution des ressources.

La croissance urbaine, pourtant, n'est pas un processus constant et homogène, où chaque intervention s'inscrirait à côté de la précédente en une "tache" qui s'élargit. L'image du territoire comme "palimpseste" est beaucoup plus proche de la réalité : un matériau où les couches d'écriture se superposent par endroit et coexistent ; un même support que l'on "gratte" avant de réécrire, parfois jusqu'à l'abîmer et le laisser en friche ; une étendue qui n'est pas infinie.³

Aussi, plusieurs modes d'appréhension de la ville se côtoient, selon les questions et les enjeux que l'on se pose. La ville comme "centralités et périphéries" pose la question de la croissance illimitée ; la "ville diffuse" pose notamment celle des infrastructures de déplacement ; ville/territoire ou villes en réseau interrogent l'organisation de la société, les dynamiques économiques, etc. Toutes ces questions font partie de la problématique actuelle du développement durable.

1 Sources : site web du *Global Urban Observatory* ; IAURIF, *l'Atlas des Franciliens*.

2 Saskia Sassen, *La ville globale*, Paris : éd. Descartes, 1996.

3 A. Corboz, *Le territoire comme palimpseste et autres essais*, éd. de l'Imprimeur, p. 209 à 229.

L'évolution des territoires, depuis la révolution industrielle, est marquée par une saisissante croissance urbaine. Elle remet en question la définition de "la ville", son mode de fonctionnement, son tissu de relations et ses usages quotidiens.

	1980	1990	2000	2010
1	28,5 Tokyo	32,5 Tokyo	34,4 Tokyo	35,8 Tokyo
2	15,6 New-York	16,1 New-York	18,0 Mexico City	20,4 Bombay
3	13,0 Mexico City	15,3 Mexico City	17,8 New-York	19,8 Mexico City
4	12,0 São Paulo	14,7 São Paulo	17,1 São Paulo	19,2 São Paulo
5	11,7 Shanghaï	13,3 Shanghaï	16,1 Bombay	19,1 New-York
6	9,9 Osaka	12,3 Bombay	13,0 Calcutta	18,2 Dehli
7	9,9 Buenos Aires	11,2 Buenos Aires	12,9 Shanghaï	15,5 Djakarta
8	9,5 Los Angeles	11,0 Osaka	12,6 Buenos Aires	15,4 Calcutta
9	9,0 Calcutta	10,9 Calcutta	10,9 Dehli	15,1 Dhaka
10	9,0 Pékin	10,9 Los Angeles	11,8 Los Angeles	14,0 Lagos
11	8,9 Paris	10,8 Pékin	11,1 Osaka	14,0 Buenos Aires
12	8,7 Bombay	10,5 Séoul	11,0 Djakarta	13,8 Karachi
13	8,6 Rio de Janeiro	9,6 Rio de Janeiro	10,8 Pékin	12,5 Los Angeles
14	8,3 Séoul	9,3 Paris	10,8 Rio de Janeiro	12,4 Shanghaï
15	8,1 Moscou	9,0 Le Caire	10,4 Le Caire	12,0 Le Caire
16	7,6 Londres	9,0 Moscou	10,1 Dhaka	11,9 Rio de Janeiro
17	7,3 Le Caire	8,8 Tianjin	10,1 Moscou	11,6 Manille
18	7,2 Tianjin	8,2 Dehli	10,0 Karachi	11,3 Osaka
19	7,2 Chicago	8,0 Manille	9,9 Manille	10,9 Moscou
20	6,3 Essen	7,6 Londres	9,9 Séoul	10,8 Pékin

Évolution de la population des villes en millions d'habitants (rapport Nations unies 2003).



1



2



3

2 1. Mélange des "vides" et des "pleins" (La Défense, Paris). 2. La ville en plusieurs couches (Tokyo). 3. Consommation spatiale (Nationale 4 - Belgique).

Une première manière de comprendre la ville est de l'appréhender par opposition à un extérieur, la "campagne". Cette perception est ancrée dans une organisation ancienne du territoire, où la question de la limite urbaine était importante. À Paris, le souci de fortifier la ville occupa encore tout le XIX^e siècle : l'enceinte de Thiers, munie de bastions et précédée d'avant-forts, fut achevée en 1845 et ce n'est qu'après la première guerre mondiale qu'on commence à la détruire.

Tout en densifiant énormément l'intérieur des enceintes, le phénomène d'urbanisation en transformait également l'extérieur : si on ne pouvait être dans la ville, il s'agissait d'en être au plus près. Les "faubourgs" sont par définition l'agrandissement progressif de la ville le long des chaussées qui mènent à ses portes. La ville croissait donc par extension, de proche en proche, mais aussi "attirée" vers l'extérieur par de nouveaux équipements : les gares, les industries ou de nouveaux parcs prenaient place dans les derniers terrains non urbanisés qui jouxtaient les centres, et des avenues étaient tracées pour les rejoindre, des quartiers étaient dessinés à leurs abords, des activités s'y implantaient.

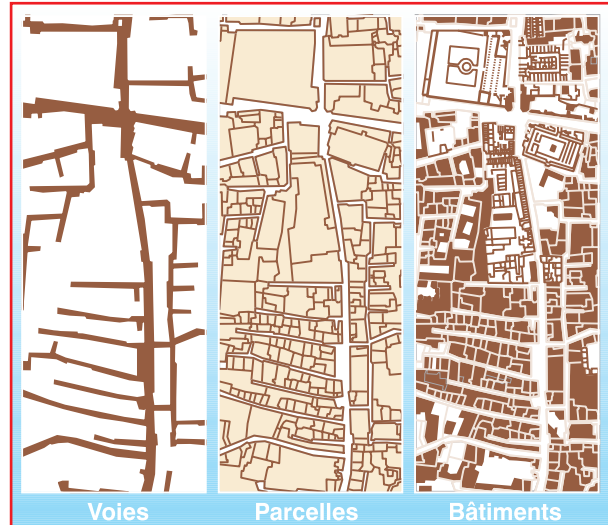
Ces structures urbaines (qui constituent aujourd'hui nos centres villes), issues d'une recherche de contiguïté et d'articulations, se caractérisent par un lien étroit entre le bâti, le système de voies et le parcellaire, les trois éléments qui constituent le tissu urbain. En effet, la forme du foncier dessine "en creux" celle de l'espace public et circonscrit celle de chaque construction. C'est cette imbrication des trois qui permet à la ville "d'évoluer tout en maintenant la cohésion de l'ensemble et la clarté de la structure"¹, dans un contexte où une multiplicité d'acteurs peuvent agir sur l'un ou l'autre pôle : la mairie perce une rue en expropriant du foncier, un promoteur démolit une maison pour construire à sa place un immeuble de rapport, un industriel rachète toutes les parcelles d'un îlot pour y implanter ses ateliers, etc.

Il importe de saisir les logiques qui sont à l'œuvre dans les relations entre ces trois termes pour comprendre ce qui change dans d'autres situations urbaines. Ainsi, nombre de préceptes du mouvement moderne allait dans le sens de leur désolidarisation. L'idée de la ville par zonage programmatique revient à la suppression des découpages fonciers ; la séparation des réseaux complexifie les usages du bâti ; avec le rejet de l'alignement et du front de rue, l'architecture devenue "objet" ne délimite plus l'espace public. La réaction post-moderne, en créant de toute pièce des ensembles qui ressemblent au passé (ruelles, placettes et diversité des volumes), n'a pas renoué avec la capacité évolutive du "tissu" : seul le dessin de l'architecte y règle les formes de l'espace urbain.

Une première question que posent ces contextes est donc celle de leur transformation à long terme : aujourd'hui on démolit à l'explosif les "barres" de logements des années 60, pour reconstruire plus loin des rangées de maisonnettes. Deuxièmement, là où se pose la question de la propriété (dans les *no man's land* entre immeubles, par exemple), se pose aussi celle de l'appropriation : la capacité à transformer un "non-lieu" en lui donnant du sens rend possible de s'y sentir "chez soi". Enfin, dans ce processus, de nombreux centres urbains en sont réduits à la monofonctionnalité : "city" de bureaux vidée à 17 h 30, centre commercial qui privatise la ville, ou musée de monuments, condamné à l'immobilité par le tourisme.

¹ Ph. Panerai, J.-Ch. Depaule, M. Demorgon, *Analyse urbaine*, Marseille : Parenthèses 1999, p. 75.

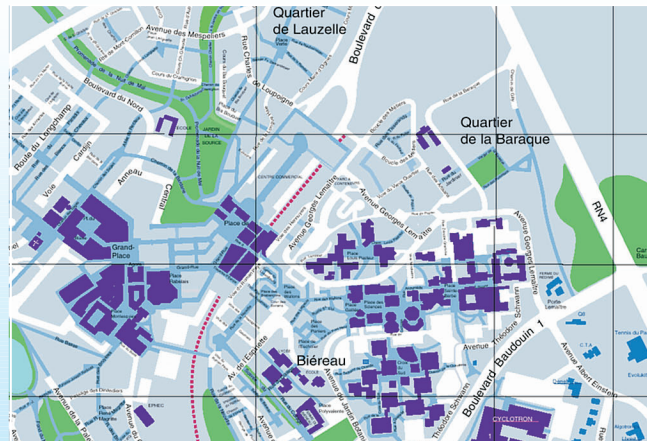
Le tissu urbain des centres villes se caractérise par un lien étroit entre le bâti, le système de voies et le parcellaire. Leur désolidarisation complexifie leurs capacités d'évolution, de diversification et d'appropriation.



Le tissu urbain : voies, parcelles et bâtiments (Ph. Panerai, J.-Ch. Depaule, M. Demorgon, *Analyse urbaine*, Marseille : éd. Parenthèses, 1999).



1



2



3

1. La suppression des découpages fonciers (grands ensembles des années 1960 : Sarcelles).
2. La séparation des réseaux de circulation (plan de Louvain-la-Neuve/Belgique).
3. La ville d'objets (Brasilia/Brésil).

La notion de ville étant traditionnellement liée à l'enjeu de la proximité, les réseaux de déplacements sont un facteur important influençant la forme qu'elles prennent. On peut donc tout d'abord analyser leur évolution en parallèle avec celle des modes de transports.

Ainsi, R. Fishman¹ oppose l'organisation radio-concentrique des métropoles industrialisées par le rail et les canaux (comme New York ou Chicago) à celle de Los Angeles, où dès les années 1920, une planification urbaine délibérément orientée en faveur du réseau routier a tapissé toute la région d'une urbanisation de faible densité, et a rendu obsolètes les notions de centre et de périphérie.

Avec la mobilité isotrope que permet l'automobile individuelle, les villes s'étaient donc en couronnes qui s'élargissent, les éléments actifs délaissant le centre ville pour des périphéries de plus en plus éloignées. La population, d'abord la plus aisée, migre vers les banlieues, suivie par l'activité commerciale et enfin le secteur tertiaire, dans les années 1980-90.

En Europe, la démocratisation de l'automobile est plus tardive (ce n'est qu'en 1969-1970 qu'elle possédera le parc automobile par habitant atteint par l'Amérique du Nord en 1930). En France notamment, la politique d'aménagement du territoire a organisé la croissance urbaine de façon très volontariste : avec la construction des grands ensembles en périphérie (depuis 1950), celle des "villes nouvelles" autour de Paris (depuis 1965), etc. Mais les phénomènes socio-économiques actuels sont identiques : dans les communes environnantes, le long des "nationales", aux entrées de villes, "la périurbanisation" investit des superficies immenses et bon marché.

Ainsi, la ville organise, draine et dessert le territoire autour d'elle, depuis l'époque où celui-ci était le producteur des matières premières et des aliments qu'elle consommait, jusqu'aux récents plans de déplacements "de banlieue à banlieue"², qui encerclent la ville de plus en plus densément.

Cependant, d'autres modes de communication prennent le pas sur les réseaux de transports, une économie de l'information succède à celle de la production, et une société de plus en plus "en réseau" déborde des institutions territorialisées (État, régions, communes). Aussi, la légitimité de leurs pouvoirs s'affaiblit, tout comme les groupes sociaux perdent la base territoriale qui les définissait, et le sentiment d'identité ou d'appartenance à un territoire est plus difficile à construire pour chaque individu.

En effet, si la ville dispose d'un territoire, la ville est aussi un territoire, au sens plus large de construction politique, administrative, ou sociale. Dans ce contexte, nous vivons aujourd'hui une "crise de la territorialité"³, qui se traduit notamment par des appropriations inégales de l'espace : celles-ci sont excessives dans les nouvelles "villes privées", les lotissements surveillés, les rues commerçantes fermées la nuit, etc., tandis que d'autres territoires non rentables, non desservis et sous équipés, sont délaissés.

Cette réécriture en cours de la cartographie des limites, des pouvoirs, et des groupes interroge notre capacité à "faire société"⁴ ; à gouverner les territoires selon "l'intérêt général" ; à assurer l'équité dans les décisions ; à donner encore un sens à "l'espace public" comme lieu de la démocratie.

1 Robert Fishman, "Metropolis Unbound", *Flux* n° 1, 1990, p. 44 à 55.

2 Direction de l'Équipement, *Schéma directeur de l'Île-de-France*, 1991, p. 82.

3 Marcel Roncayolo, *La ville et ses territoires*, Paris : Gallimard, 1990, p. 213 à 217.

4 Jacques Donzelot, *Faire société*, Paris : Seuil, 2002.

**La ville a un territoire, qu'elle gère et organise.
La ville est aussi un territoire, au sens politique, administratif ou social, qui questionne son identité, ses modes de représentations et d'appropriations.**

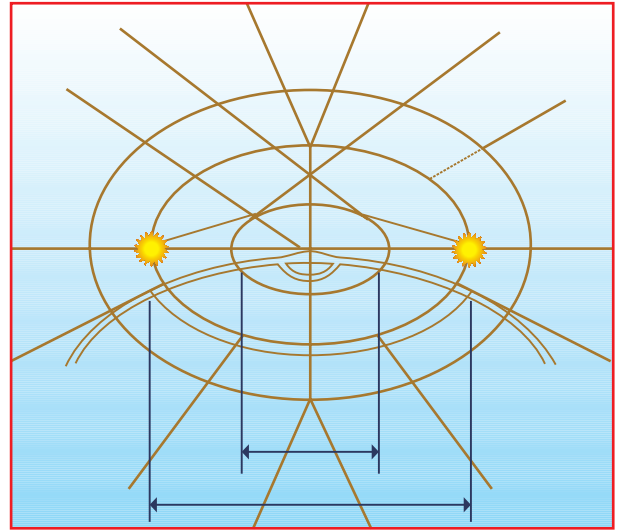
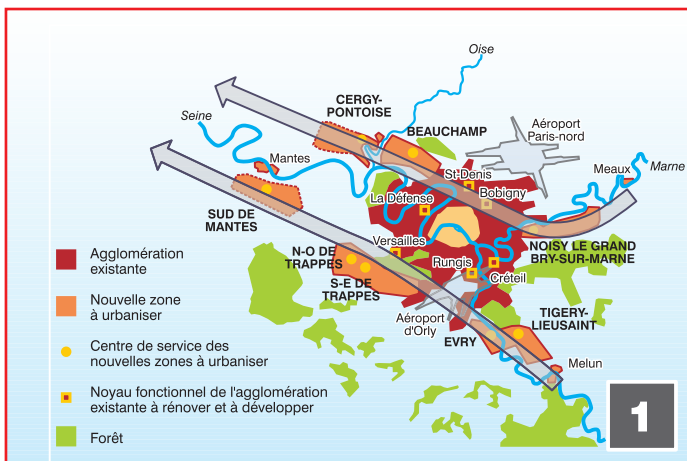


Schéma radio-concentrique d'organisation de Paris (d'après Eugène Hénard). 1



- 2 1. Schéma d'extension de Paris.
2. Marquer son territoire (tags).
3. Des espaces publics privatisés ("commercial mole").

Depuis le début du XX^e siècle, des chercheurs se penchent non plus sur les relations d'une ville à son territoire mais sur les liens de plusieurs villes entre elles. E. Howard, qui a proposé le modèle des cités-jardins, avait pour objectif une meilleure maîtrise de la croissance urbaine, sous la forme de villes-satellites autonomes reliées entre elles par un important réseau de transports. D'autres cherchaient à dégager des lois qui expliqueraient la distribution des villes existantes dans le territoire, comme la "théorie des lieux centraux" de Walter Christaller (1933)¹.

Cet économiste allemand a modélisé le territoire comme un système de pôles urbains hiérarchisés et d'aires de dépendances qui s'emboîtent en mailles hexagonales croissantes, issu d'une échelle de "rareté" des biens : les villages qui n'offrent que les premières nécessités sont les plus nombreux, et les plus petits ; les villes qui proposent un plus grand nombre de spécificités sont moins nombreuses, plus importantes en taille, et réparties le plus régulièrement possible. Ce modèle théorique décrit assez bien l'implantation historique des villes, dans un relief peu contraignant. Mais il était fondé sur des relations de *proximité* traditionnelles, où la durée de déplacement est proportionnelle à la distance que l'on parcourt (et à l'effort, physique ou financier, à fournir). Avec les transformations radicales dans les modes de transports et de (télé)communications, c'est *l'accessibilité* qui devient le facteur important.

Melvin Webber² a montré, dès 1964, comment un individu est partie prenante d'un grand nombre de réseaux, du local à l'international, et que plus ces réseaux sont spécialisés (il prend l'exemple d'un chercheur en virologie), moins ils sont nombreux et plus ils sont étendus dans l'espace. Cette "érosion du localisme" devait alors, pour lui et ses successeurs, engendrer la dispersion définitive des agglomérations urbaines, devenues superflues. Mais Saskia Sassen³, plus récemment, a étudié comment ce qu'elle nomme le réseau de "villes globales" (Londres, Tokyo, New York) fonctionnait entre elles, par delà les autres villes, les distances géographiques et les frontières politiques ; elle met au contraire en évidence des sur-concentrations locales de moyens, de services et d'entreprises dans ces quelques villes. Ce qui a des conséquences importantes.

En France, notamment, on redoute la "désertification" qui irait de pair avec cette polarisation des richesses : depuis "l'effet tunnel" provoqué par les TGV (où les territoires, bien que traversés, ne profitent pas de retombées économiques et ne gagnent rien en accessibilité) ; jusqu'à la lutte contre la suprématie de Paris, à travers les lois de décentralisation. Aux USA, des sociologues⁴ dénoncent la manière dont les nouvelles formes de production délocalisées et "flexibles" engendrent l'uniformisation des lieux de travail et de la ville en général, mais aussi le désengagement de cette "nouvelle élite mondiale" dans le champ politique urbain : "elle veut bien mener ses activités dans la cité, mais elle refuse de la diriger ; c'est un système de pouvoir sans responsabilité".

C'est pourquoi il faut se demander à quel point "la société en réseau" ne crée pas, paradoxalement, des déséquilibres importants ; et si elle n'éloigne pas le citoyen de la possibilité de participer à sa gouvernance.

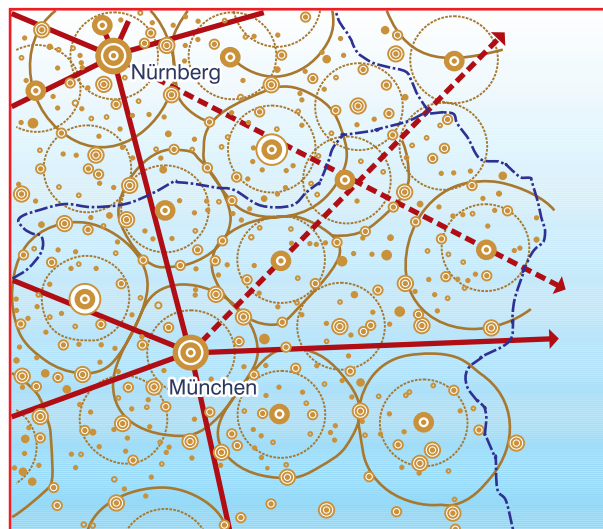
1 Walter Christaller, *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Iena : G. Fisher, 1933.

2 Melvin M. Webber, *L'urbain sans lieu ni bornes* (préf. de Fr. Choay), éd. de l'Aube, 1996.

3 Saskia Sassen, *Global Cities*.

4 Richard Sennett, *Le travail sans qualité : les conséquences humaines de la flexibilité*, Paris : Albin Michel, 2000.

Le critère de *proximité*, qui hiérarchisait l'organisation des territoires est aujourd'hui remplacé par celui d'*accessibilité*. Mais la redistribution des fonctions économiques en réseaux horizontaux peut provoquer des déséquilibres importants.



Le modèle classique des "lieux centraux" (d'après Walter Christaller).

Nombre de villes européennes par classe :

Classe 1 : métropoles de rang mondial (2)

Paris, Londres

Classe 2 : métropoles européennes majeures (3)

Amsterdam, Madrid, Milan

Classe 3 : métropoles européennes (8)

Berlin, Munich, Lisbonne, Barcelone, Bruxelles, Vienne, Stockholm, Rome

Classe 4 : grandes villes d'importance européenne (15)

Lyon, Marseille, Toulouse, Cologne, Francfort, Düsseldorf, Hambourg, Dublin, Athènes, Zurich, Genève, Copenhague, Helsinki, Oslo, Florence

Classe 5 : grandes villes à potentiel européen (34)

Strasbourg, Bordeaux, Lille, Nice, Montpellier, Nantes, Grenoble, Stuttgart, Hannover, Birmingham, Manchester, Rotterdam, Anvers, Bilbao, Séville, Porto, Naples...

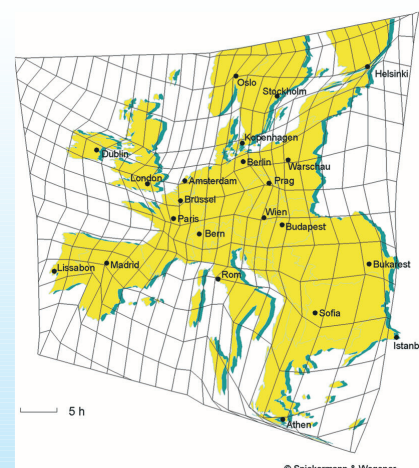
Classe 6 : villes d'importance nationale affirmée (39)

Cannes, Rennes, Nancy, Dijon, Rouen, Angers, Clermont-Ferrand, Mulhouse, Brest, Dresde, Brême, Leipzig, Liverpool, La Haye, Gand, Heindhoven, Lausanne, Gênes, Bari, Palerme, Saragosse...

Classe 7 : autres villes d'importance nationale (79)

Tours, Metz, Reims, Toulon, Le Havre, Orléans, Saint-Etienne, Valenciennes, Béthunes, Lens, Sarrebruck, Cardiff, Brighton, Leicester, Liège, Cordoue, Saint-Sébastien, Valladolid, Bergame...

1



2



3

2 1. Tableau comparatif du rayonnement des villes européennes, suivant les indicateurs d'activité économique et de fonctions internationales. 2. Les cartes isochrones : l'espace géographique déformé suivant "les distances temporelles" et non spatiales (d'après Spiekermann & Wegener, Urban and Regional Research, Dortmund, 1993). 3. Le réseau TGV en France, un facteur de déséquilibres territoriaux.

Pour beaucoup, c'est la dernière phase de l'expansion de la ville : son "éparpillement" dans le territoire, résultant d'une large aspiration sociale à de faibles densités bâties. Il s'agit cependant de distinguer le *processus* d'étalement urbain (ou *urban sprawl*), et l'*état de fait* qu'est l'urbanisation dispersée (ou *città diffusa*), qui n'en découle pas nécessairement¹.

Le premier terme dépeint de nombreux phénomènes : la périurbanisation progressive évoquée plus haut, qui, à terme, engendre la *conurbation* de centres urbains existants, que Jean Gottmann a nommée *mégalo* en 1961 dans son étude sur Boston-New York-Washington. Puis, les *polycentralités* que l'étalement urbain lui-même engendre : *Edge-city*, les banlieues devenues villes (J. Garreau, 1999) ; *Ex-urbia*, les villages habités par les navetteurs (M. Gandelsonas, 1990) ; mais aussi les nouvelles zones économiquement attractives que sont les grands échangeurs ; et surtout, le développement urbain des villages ruraux, de moins en moins agricoles.

Un ouvrage de 1976 analyse en profondeur ce développement qu'il nomme *rurbanisation*². Les auteurs le distinguaient des banlieues, non seulement parce que celles-ci étaient constituées en prolongement de la "ville-mère", mais aussi parce qu'elles avaient une structure destinée, à terme, à se densifier pour former un cadre de vie urbain. Tandis que dans les territoires *rurbanisés* (mais considérés encore comme une forme d'extension de la ville), ils avançaient l'hypothèse radicale que la proportion d'espaces urbanisés (maisons, jardins privés, équipements, zones d'emplois) n'excéderait jamais 10 à 20 % de la surface totale : "pour la première fois, le territoire à l'intérieur duquel peut s'organiser la vie des citadins est considérablement plus vaste que la surface dont la ville a besoin".

Depuis les années 1990, on nomme *ville diffuse* des territoires qui se sont urbanisés indépendamment de tout "centre", et dont la densité bâtie est faible mais relativement uniforme sur de grandes surfaces, c'est-à-dire, où la mixité des "pleins" et des "vides" est très fine (l'inverse des catégories villes-campagnes) : les lotissements de maisons "4 façades" ; les kilomètres de routes où les commerces se succèdent indifféremment, sans relation, ni entre eux, ni avec la rue ; les surfaces immenses de parking ; les champs qui se cultivent encore dans les larges mailles d'un "filet" de rues très lâche, etc.

Mais l'étude de la ville diffuse résulte en réalité d'un décalage des représentations, cadrées cette fois sur les territoires "vides", les entre-deux, sur plusieurs centralités à la fois, ou encore sur des fragments, selon les échelles. Et ce que ce type de regard découvre, c'est souvent l'absence de planification³ : la constitution d'un territoire par bribes juxtaposées, issu de milliers d'initiatives isolées, des habitants, de promoteurs immobiliers, d'ingénieurs autoroutiers, d'investisseurs commerciaux, etc.

Aussi, sachant que "la nature" et l'espace ne sont plus des biens illimités, sachant le coût des infrastructures nécessaires à ce mode de vie, non seulement se pose la question de sa gestion et de son organisation spatiale, mais aussi celle de sa pérennité. Car ce processus est en puissance son propre "prédateur", puisqu'il détruit le paysage "vide" dont il rêve de jouir.

1 Bénédicte Grosjean, "Généalogie urbaine d'un village du Brabant : pour une histoire diffuse de la grande ville" : *Le visiteur* n° 10, printemps 2003, p. 68 à 97.

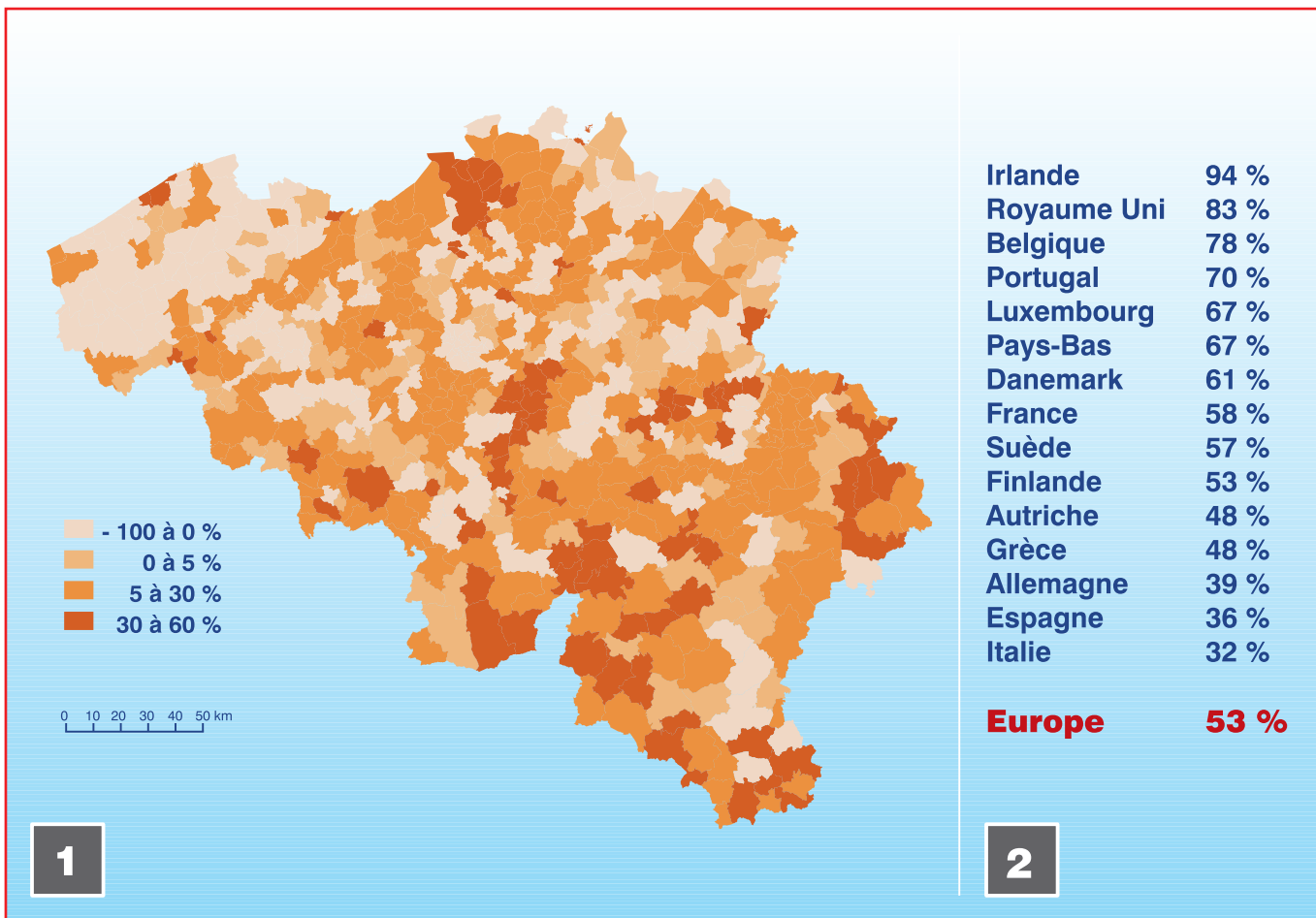
2 G. Bauer, J.-M. Roux, *La rurbanisation ou la ville éparpillée*, Paris : Seuil, 1976.

3 Bernardo Secchi, Christina Bianchetti, "Milano, ad esempio", *Casabella* n° 596, décembre 1992, p. 44 : "Dans les territoires de la dispersion, c'est principalement à sa propre absence que l'urbaniste se voit confronté" (trad. BG).

L'étalement urbain est un processus qui résulte de l'aspiration sociale à de faibles densités bâties. La ville dispersée est un état de fait, qui pose la question de sa pérennité.



“La ville idéale ?”. Affiche publicitaire pour le secteur 4 de Marne-la-Vallée, urbanisé par Disney (Établissement Public d'Aménagement Marne et l'EPA France, 2003).



1. Évolution de la part de la population dispersée en Belgique, de 1981 à 1991 (d'après F. Derwael et J.-M. Halleux).
2. Part de logements individuels en Europe (Eurostat 1995).

Le “développement durable”, notion très récente dans l'histoire des idées, n'est pas neuve pour autant ; elle est le fruit de problématiques anciennes qu'elle réactualise et dont il convient d'observer la généalogie.

En particulier, on ne peut comprendre la notion actuelle de “développement durable” sans la ramener à la manière dont le XIX^e siècle s'est posé le problème de la relation de l'Homme à la Nature ; à savoir, sur le mode d'une interaction fondamentale et ontologique, et surtout dans la perspective d'une évolution continue des espèces vivantes.

C'est au sein des sciences naturelles que s'est opérée d'abord cette révolution évolutionniste. Après avoir été formulée par Lamarck dès 1809, elle s'est véritablement opérée à la fin des années 1850, lorsque deux naturalistes anglais, Charles Darwin et Alfred Wallace proposèrent – indépendamment l'un de l'autre – une théorie expliquant la transformation des espèces (animales et végétales) sous l'effet non seulement de leur milieu mais aussi de leurs semblables (sélection naturelle). Ces théories ont eu un impact immédiat sur la communauté scientifique ; on peut citer Thomas H. Huxley qui diffusa le darwinisme à l'université anglaise ou encore Ernst Haeckel, zoologue allemand qui inventa en 1866 le terme “écologie” pour désigner : “la science qui étudie les conditions d'existence des êtres vivants et les interactions de toute nature qui existent entre ces êtres vivants et leur milieu.”

Mais ces nouvelles doctrines ne sont pas restées confinées aux sciences de la nature. Elles sont entrées en résonance avec les préoccupations de bien d'autres champs scientifiques (à une période où les limites disciplinaires étaient beaucoup plus poreuses et mouvantes qu'aujourd'hui). L'ensemble des sciences humaines a été traversé par les problématiques évolutionnistes : l'anthropologie, la sociologie (alors émergente), l'économie, l'histoire, la philosophie (H. Bergson), la psychologie et même, la littérature (naturalisme, É. Zola, G. de Maupassant, etc.).

S'appuyant eux-aussi sur les doctrines de l'évolution, ce sont les géographes qui vont opérer la synthèse la plus proche de notre conception actuelle de l'environnement. Forts de la tradition déjà ancienne de l'anthropogéographie qui articulait déjà histoire des sociétés humaines et étude de l'espace physique, et forts de leurs méthodes scientifiques d'observation qui croisent celles des naturalistes, les géographes seront, tout au long du XIX^e siècle, à la recherche d'une compréhension globale des phénomènes terrestres et des interactions mutuelles entre les groupes humains et leurs milieux géographiques. Des géographes comme K. Ritter, A. de Humboldt, F. Ratzel, É. Reclus, partageront tous cette curiosité transdisciplinaire, cette approche où l'Homme et la Nature sont inséparables.

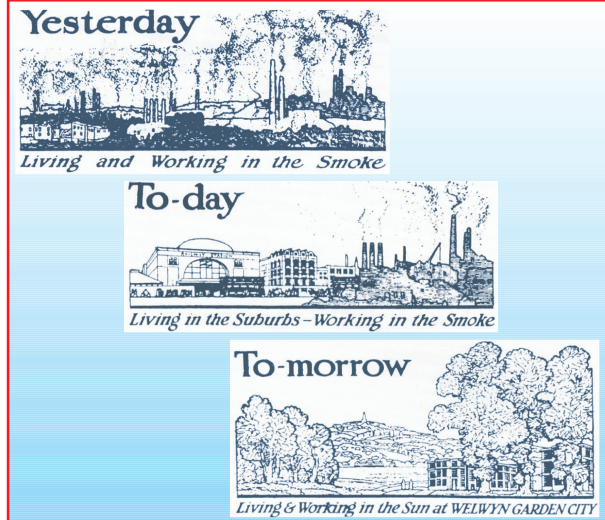
Un des terrains privilégiés (bien que problématique) de ces réflexions sera la ville, qui à cette époque connaît une phase d'industrialisation et d'extension sans précédent. Dans son célèbre texte “the Evolution of Cities” (1895)¹, É. Reclus envisage la ville comme un organisme vivant en évolution, un objet d'un savoir à la fois social, historique, économique et géographique. Cette vision à la fois naturaliste, évolutionniste et multidisciplinaire de la ville sera très active au moment de l'émergence de la discipline urbanistique, notamment par le biais des écrits de l'Écossais Patrick Geddes² en Grande-Bretagne ou, sur un mode plus vitaliste, de ceux de Marcel Poëte³ en France.

1 Élisée Reclus, “The Evolution of Cities”, *Contemporary Review*, février 1895, p. 246 à 264.

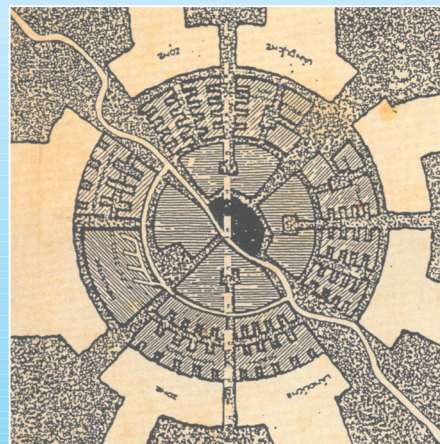
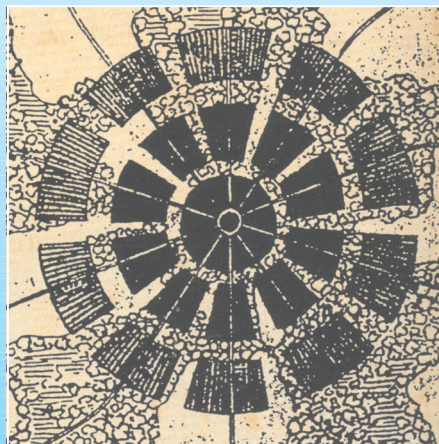
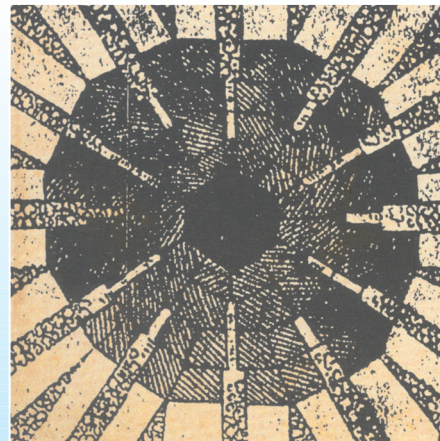
2 Patrick Geddes, *Cities in Evolution*, Londres : Williams&Norgate, 1915.

3 Marcel Poëte, “L'évolution des villes”, *Introduction à l'urbanisme*, Paris : Boivin, 1929.

Milieu / fonction / organisme : la triade évolutionniste serait aux sources du "développement durable"? Cette notion réactualise en tout cas des problématiques anciennes, qu'il convient d'observer.



Propagande pour le mouvement anglais des cités-jardins (de Welwyn Garden City, Raymond Unwin, 1920).



2 Analogie entre une substance végétale vue au microscope et un schéma de développement urbain (d'après J.H. Stubben et P. Wolf - 1910).

La première moitié du XX^e siècle voit, en Europe, la progressive fondation de l'urbanisme et du *Town Planning* dans une perspective de réelle autonomie disciplinaire (institutions, filières de formation, organisations professionnelles propres) mais sans échapper cependant à une profonde hétéronomie (toujours à l'articulation de multiples disciplines déjà existantes : architecture, sociologie, géographie, histoire, économie, etc.). Toutes ces disciplines, d'ailleurs, portent elles-mêmes, à l'époque, un intérêt croissant à la ville comme objet de science et de savoir. Les villes, dont l'expansion et la densification constituent un phénomène sans précédent dans l'histoire humaine, se présentent alors comme le milieu ultime, comme la nouvelle "nature" de l'homme moderne, et se posent de ce fait à la communauté scientifique comme une problématique centrale et incontournable.

Toutes les sciences humaines vont être, alors, traversées par des projets transdisciplinaires, dans le but de cerner, d'englober cette problématique (ces projets, souvent concurrents, vont d'ailleurs s'accompagner de vives controverses épistémologiques). Les géographes, on l'a vu, dans le cadre de la géographie humaine, s'ouvrent à tout un champ d'explications sociales, économiques et historiques des phénomènes d'urbanisation, envisagés alors dans leur complexité bio-géographique (cf. en France la revue *Annales de géographie*). Les historiens, dans le cadre par exemple de la revue, *Synthèse*, dès 1900 ou de la revue des *Annales*¹, à partir de 1929, se lancent, eux aussi, dans des programmes pluridisciplinaires, où l'histoire s'oblige à envisager les sociétés humaines dans leurs interactions concrètes avec leur milieux physiques.

La sociologie, quant à elle, en tant que discipline beaucoup plus jeune, semble la plus à même de réaliser ce type de synthèse, autour de l'objet urbain. On assiste alors à une "géographisation" des sciences sociales, dont on retrouve, en France, les effets les plus évidents dans la "morphologie sociale" d'Émile Durkheim ou bien dans la sociologie de Frédéric Le Play. La sociologie se tournera aussi abondamment vers les sciences naturelles qui lui offrent des perspectives à la fois plus scientifiques et plus holistiques : la société et la ville étant pensées alors comme des corps macroscopiques, dont les parties sont organiquement en interaction au sein d'un tout, et dont le milieu physique détermine la forme évolutive. L'École de Sociologie de Chicago², dès les années 1920, qualifiera même son travail d'"Écologie humaine". La première génération de ce courant sociologique (Robert E. Park, Ernest W. Burgess, Roderick D. McKenzie, etc.), puisant dans la biologie des concepts tels que communauté, ségrégation, invasion, succession, compétition et symbiose, posent la ville comme un véritable "phénomène naturel"³, lieu d'un façonnement réciproque entre des groupes sociaux et une topographie architecturale et urbaine.

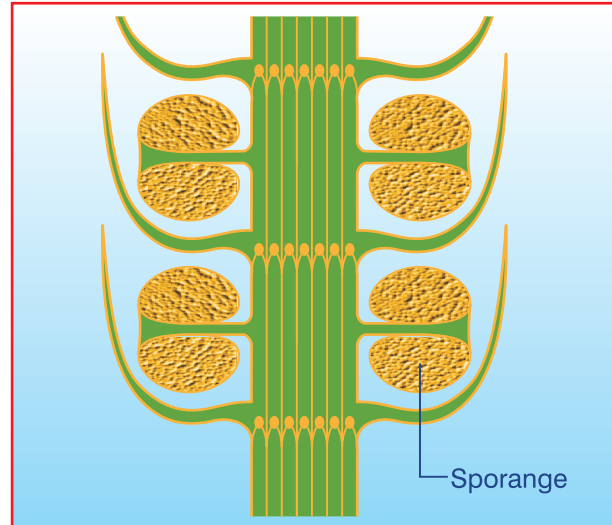
Ces multiples stratégies savantes, qui ne se départissent jamais d'une conscience aiguë des problèmes sociaux, urbains et environnementaux – et donc de la perspective d'une action positive – préfigurent nos préoccupations actuelles en matière de développement durable, bien que celles-ci se formulent aujourd'hui non plus à l'échelle d'une ville ou d'une région mais à l'échelle de la planète entière.

1 Cf. Les *Annales d'histoire économique et sociale*, revue fondée par Marc Bloch et Lucien Fèbvre en 1929.

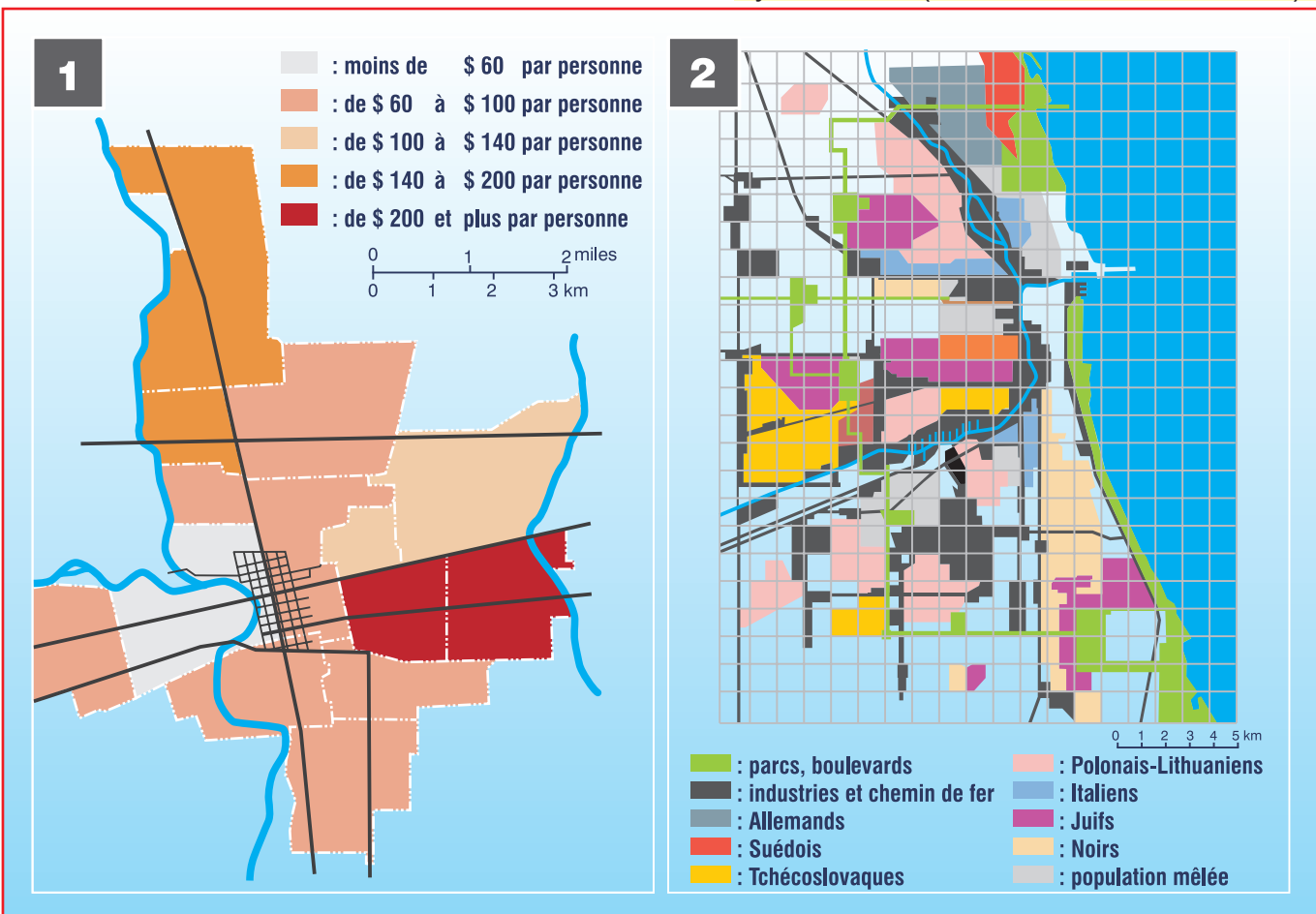
2 Cf. Isaac Joseph, Yves Grafmeyer (éds), *L'École de Chicago : naissance de l'écologie urbaine*, Paris : éd. du Champ Urbain, 1979.

3 Cf. Robert E. Park, "The City as natural Phenomenon", *Human Communities*, NY : Free Press, 1952.

De nombreux urbanistes à cette époque posent la ville comme un véritable "phénomène naturel", et puisent leur inspiration dans la biologie. L'École de Chicago nomme "écologie humaine" ses études thématiques de sociologie urbaine.



"Notre sens de l'harmonie nous vient de la nature. Si nous sommes sensibles à ses œuvres, c'est que nous appartenons à son système" (Le Corbusier, 1924).



1. Carte de Columbus (Ohio) qui montre la division de la ville en fonction des revenus des habitants (d'après Roderick McKenzie - 1921).
2. Implantation des différentes ethnies à Chicago (d'après Maurice Halbwachs - 1922).

Fin des années 1960, la problématique écologique prend une nouvelle forme et une nouvelle ampleur. Il devient évident que le développement industriel (en plein essor depuis la fin de la guerre), la croissance économique et le productivisme génèrent des nuisances : la pollution rejetée dans l'air et dans les eaux ; la déforestation et la désertification ; les menaces contre la conservation des sols, de la flore et des espèces sauvages.

Le "Club de Rome", association internationale créée en 1968 pour étudier, au niveau mondial, les problèmes des conditions de vie liées au développement économique, analyse 5 variables dans son rapport, *Les limites de la croissance* (1972) : la technologie, la population, l'alimentation, les ressources naturelles et l'environnement ; et ses conclusions, même controversées, attirent l'attention sur les risques d'emballement et d'effondrement rapide du système mondial. La première conférence internationale sur l'Environnement se tient à Stockholm (1972), initiée par la Suède, qui a constaté de graves dommages causés aux milliers de lacs du pays par la pluie acide, résultat de la pollution de l'air en Europe occidentale.

Sur le fond de cette prise de conscience, et devant l'impuissance, à ce moment, des disciplines instituées (sociologie, géographie, etc.) à associer des facteurs sociaux et spatiaux, l'écologie apparaît à nouveau comme un recours essentiel, à la fois théorique et pratique, et elle tente de s'ériger en science autonome des milieux habités. Les questions posées à cette "écologie scientifique" sont surtout biophysiques, visant à la compréhension objective des effets des activités humaines sur les écosystèmes naturels.

Pour "l'écologie urbaine", qui se construit dans ces années 1970 autour de la volonté de réintégrer *l'homme* au sein des écosystèmes, la ville est donc envisagée comme un milieu, où les espèces interagissent et s'adaptent. Un milieu qui a des capacités à s'autoréguler et sur lequel on peut projeter les modèles quantitatifs de l'écologie scientifique.

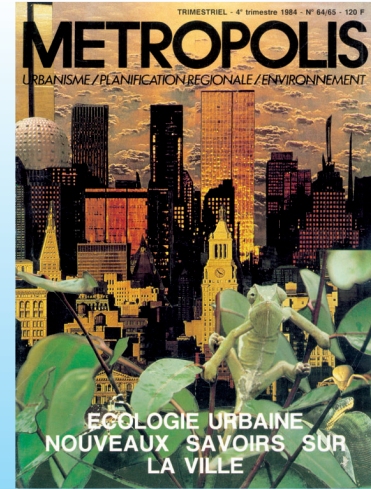
Cependant, à cette époque, l'image de la ville est très négative ; on la considère non seulement comme la source de nuisances environnementales mais également de dysfonctionnements sociaux, voire de maladie mentale (en France, on parle du "mal des banlieues" ou de "la sarcellite"). On tente plutôt de la fuir, et si c'est bien elle qui pose les problèmes, on cherche ailleurs les solutions (par la création des parcs nationaux en 1976 notamment). La ville, comme incarnation du progrès technique, de la consommation de masse, de la volonté de maîtrise totale de l'homme sur son milieu est alors rejetée comme modèle. Dans ce contexte, l'urbanisme planificateur et technocratique qui a présidé à la reconstruction, après-guerre, fait l'objet de violentes critiques, ainsi que tout ce qu'il a produit (grands ensembles, ségrégation sociale, déracinement...), comme l'exprime le manifeste de 1984¹.

Aussi, la ville, à la fois organisme et milieu, pure artéfact et nouvelle "nature", à la fois cause et effet, posait à l'écologie urbaine des problématiques épineuses et spécifiques² : elle s'efforçait en effet de combiner d'une part, le souci scientifique de s'immerger dans la complexité des interactions qui est le propre des écosystèmes, et d'autre part, la volonté de proposer des solutions directement opératoires en alternative aux pratiques urbaines de l'époque.

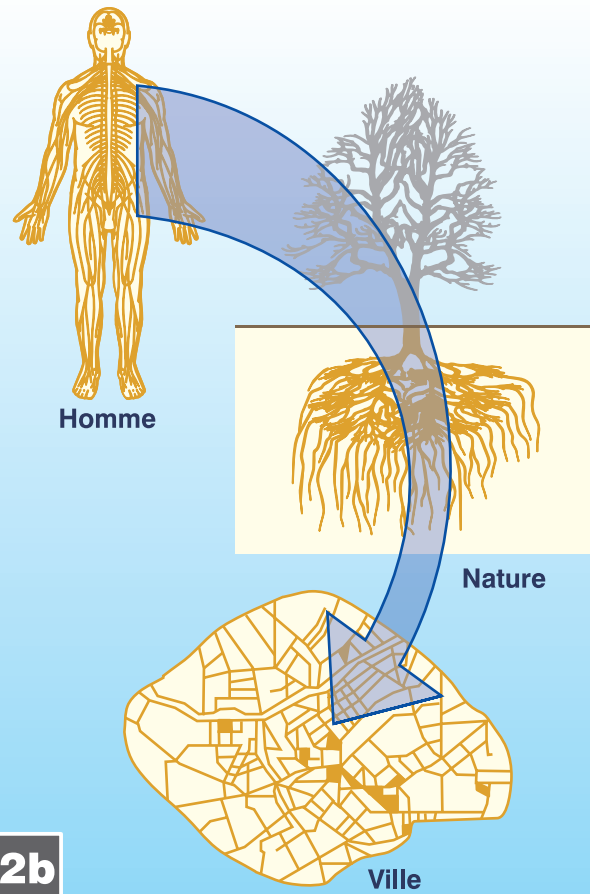
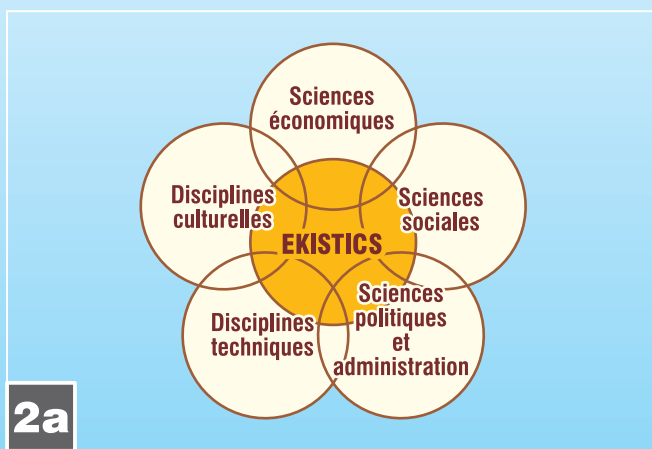
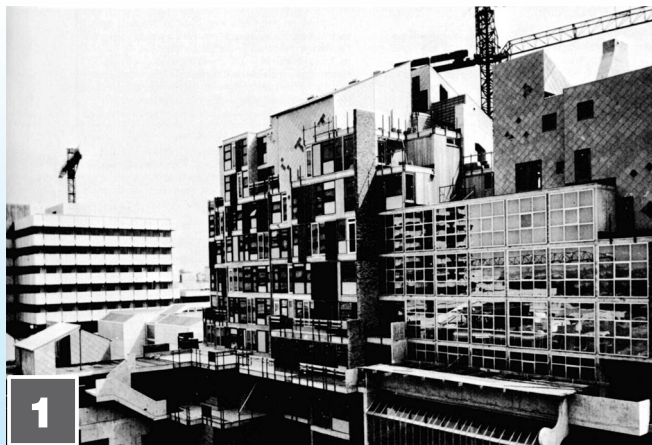
1 C. Garnier, P. Mirenowicz, "Manifeste pour l'écologie urbaine", *Metropolis*, n° 64-65, 1984, p. 6 à 19.

2 Cf. V. Berdoulay, O. Soubeyran, *L'écologie urbaine et l'urbanisme*, Paris : La Découverte, 2002 (chap. 1 et 2).

L'écologie urbaine, dans les années 70-80, s'efforçait de combiner le souci scientifique de prendre en compte la complexité des écosystèmes et la volonté de proposer des solutions opératoires, alternative à l'urbanisme planificateur de l'époque.



N° 64-65 de la revue *Metropolis* consacré à l'écologie urbaine.



2 1. La Maison médicale - architecte : Lucien Kroll (Bruxelles, 1974). Projet de logement pour étudiants élaboré avec leur participation. 2. Un exemple "d'écologie scientifique" (d'après C.A. Doxiadis) : 2-a) l'influence des sciences ; 2-b) l'analogie homme/nature/ville.

À partir des années 1980, ce ne sont plus seulement des atteintes écologiques à des écosystèmes particuliers que l'on redoute mais bien aux mécanismes de régulation globale de la planète. On a pris conscience que le développement des modes de vie, de production et de consommation des pays riches comme des pays "en voie de développement", est incompatible à long terme avec la survie de notre milieu. Le rapport fait aux Nations unies par Mme Brundtland (1987), "Our common Future", plaide alors pour un développement, certes, mais qui soit *durable*, c'est-à-dire "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs."

En effet, deux "piliers" du développement économique tel qu'il est inscrit dans notre système de pensée depuis le XIX^e siècle sont aujourd'hui remis en cause¹ :

- Tout d'abord, la nature n'est plus un bien libre et illimité. Nos capacités de transformation du monde sont devenues telles que nous menaçons la nature dans son existence, dans sa capacité à se réguler et à se reproduire. Il y a donc une nouvelle contrainte, la "rareté" de la nature, à appliquer aux modèles économiques actuels.
- Par ailleurs, une hausse du "quantitatif" ne se confond plus avec une hausse du "qualitatif". Si, au siècle passé, plus de blé créait toujours plus de bien-être, ce n'est plus tant la production des biens qui pose problème aujourd'hui que leur répartition, et leur finalité. Les communautés humaines et les valeurs qu'elles se définissent doivent également être prises en compte dans l'évaluation d'un projet de développement.

Le développement durable se définit donc aussi comme un "volet qualitatif" de la croissance (quantitative), qui doit s'ouvrir à un ensemble de régulations ne relevant plus seulement de l'économique : les contraintes liées à la nature et aux hommes. C'est ce qu'exprime le schéma, devenu classique déjà, des trois cercles qui s'intersectionnent pour circonscrire les 3 objectifs principaux¹ du mouvement pour le développement durable :

- 1) l'intégrité de l'environnement. Il s'agit d'inclure, dans l'ensemble des actions des communautés humaines, la préoccupation de la vitalité et de la diversité des gènes, des espèces et de l'ensemble des écosystèmes naturels terrestres et aquatiques.
- 2) l'équité entre les nations, les individus et les générations, en favorisant l'accès pour tous à l'emploi, à l'éducation, aux services médicaux et sociaux, à un logement de qualité ; en prônant le respect des droits de la personne ; en permettant la participation, pour l'ensemble des groupes de la société, aux différents processus de prise de décision.
- 3) l'efficacité économique, en favorisant la gestion optimale des ressources humaines, naturelles et financières, afin de permettre la satisfaction des besoins des communautés humaines.

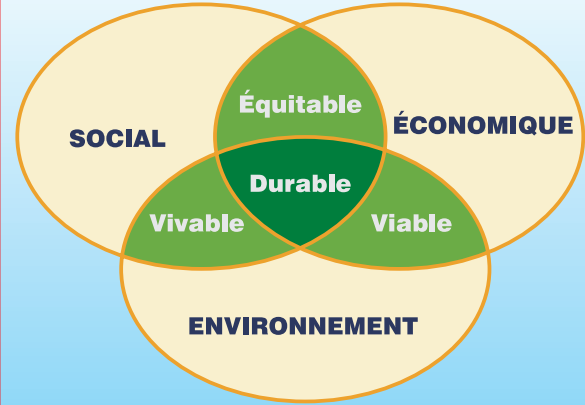
Remarquons enfin que la traduction de l'anglais "sustainable" est souvent contestée. En effet, "durable" prête à confusion : il ne s'agit pas de faire "durer" toutes choses, mais plutôt de maintenir les fonctions de leur renouvellement ; on lui reproche également d'être "fourre-tout", et trop facilement consensuelle... les textes qui suivent tenteront donc continuellement de l'éclaircir.

1 Cf. René Passet, "Les impératifs du développement durable" : *Bulletin de la CPAU* (Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme) n° 37, novembre 2001, p. 4 à 8.

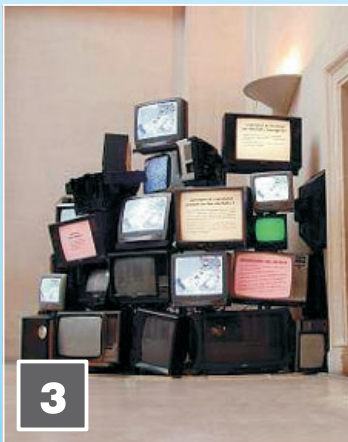
2 On en trouve une bonne synthèse sur le site du ministère de l'Environnement québécois : <http://www.menv.gouv.qc.ca/indexA.htm>

Les modes de développement actuels sont incompatibles avec la survie de la Terre. Les Nations unies plaident pour "un développement qui réponde aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs".

Le développement est durable s'il est conçu de manière à en assurer la pérennité du bénéfice pour les générations futures.



"Participation – solidarité – précaution". 1



2 1. Explosion du réacteur nucléaire de la centrale de Chernobyl - 1986. 2. Naufrage de l'Érika au large de la Bretagne - 1999. 3. Surproduction. 4. Surconsommation. 5. Déchets - pollution.

Le plaidoyer pour un "développement durable" se diffuse rapidement : non seulement à travers les conférences mondiales (du Sommet de Rio de Janeiro en 1992 à celui de Johannesburg en 2002) mais aussi parce que, pour la première fois, les "principes" s'inscrivent progressivement dans des directives, notamment européennes, puis dans des engagements nationaux réels et des lois de plus en plus coercitives.

Alors que l'écologie urbaine peinait à se constituer comme science, le développement durable, comme doctrine politique, est largement fédérateur. Il permet en effet une formulation synthétique de problématiques dispersées, et l'intégration des questions sociales et environnementales, sur laquelle avait buté les années 1970 ; en outre, il bénéficie également d'un mouvement de pensée de plus en plus vaste, qui le baigne aujourd'hui, et qui questionne la distinction traditionnelle entre l'homme (la culture, la technique) et la nature.

Depuis la Renaissance, en effet, la société moderne, la science et son objectivité, sont fondées sur l'effort de dissocier le "fait naturel" du "fait social" : *l'homme* est un "sujet", qui agit ; *la nature* est "l'objet" passif de son étude ; le scientifique est le porte-parole de la nature, qui est muette. Mais tout au long du XX^e siècle, émerge un progressif renversement de ces pôles, de l'homme moderne qui domine la nature, à l'homme qui est le "parasite" de la nature. Dans les années 1990, les philosophes cherchent à exprimer autrement la dualité entre ce qui est "culturel" et "naturel" : M. Serres¹ propose de passer un "contrat" avec la nature, d'établir ainsi une symétrie et de la réhabiliter comme un "sujet de droits" ; A. Berque² nomme "trajectivité" les interactions bilatérales qui font que notre milieu et nous-mêmes nous définissons l'un l'autre ; B. Latour³ remet en question la dichotomie sujet/objet, en proposant de remplacer les humains/la nature par un "collectif" des deux, chargé de construire une nouvelle politique respectueuse de tous.

La ville est, on l'a vu, faite d'interactions, à la fois le "milieu" de l'homme et son artefact. Elle apparaît donc comme le lieu d'application par excellence du développement durable et ce, non plus seulement parce qu'elle est source des nuisances mais surtout, parce qu'elle est le lieu possible de la synthèse homme/développement/nature, loin de la vieille dichotomie ville/campagne. La "ville durable" devient donc un pan capital de la réflexion et de nombreux travaux se sont penchés sur le problème spécifique de sa définition. La charte d'Aalborg (1994), diffusée par la Commission française du développement durable (1996), l'a caractérisée comme une ville :

- dont les habitants disposent des moyens d'agir pour qu'elle soit organisée et fonctionne dans des conditions politiques, institutionnelles, sociales et culturelles satisfaisantes pour eux et équitables pour tous ;
- dont le fonctionnement et la dynamique satisfont à des objectifs de sécurité des conditions biologiques de vie, de qualité des milieux et de limitation des consommations de ressources ;
- qui ne compromet ni le renouvellement des ressources naturelles, ni le fonctionnement des écosystèmes micro-régionaux englobants, ni enfin, les grands équilibres régionaux et planétaires indispensables au développement durable des autres communautés ;
- et qui s'attache à préserver les capacités de vie et les potentialités de choix des générations futures.

1 Michel Serres, *Le contrat naturel*, Paris : éd. Fr. Bourin, 1990.

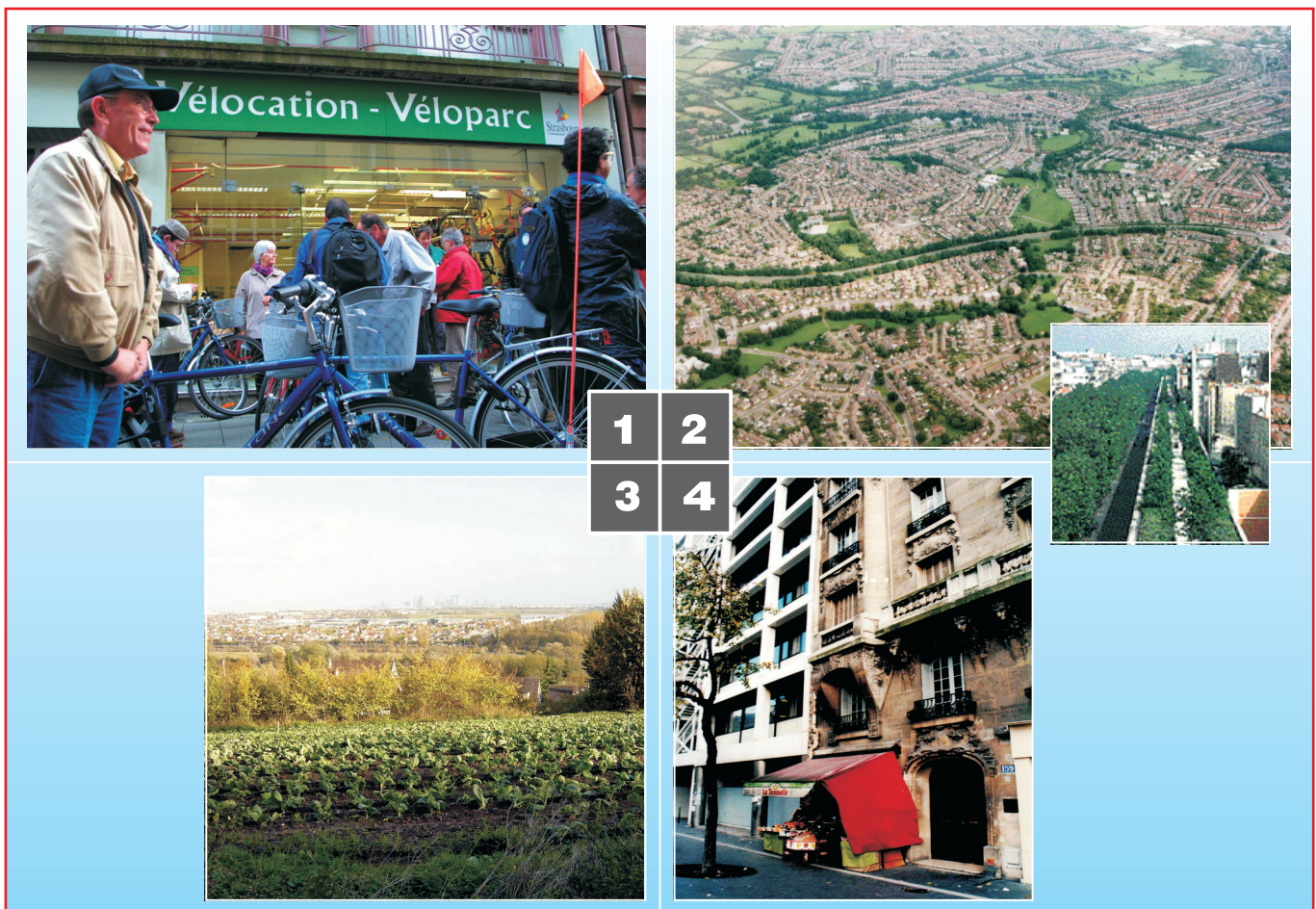
2 Augustin Berque, *Être humains sur la terre*, Paris : Gallimard, 1996.

3 Bruno Latour, *Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie*, Paris : La Découverte, 1999.

Le plaidoyer pour un "développement durable" se diffuse rapidement. Il baigne dans un courant de pensée qui vise à rééquilibrer les rapports entre l'homme et la nature. La "ville durable" devient progressivement le principal objet de réflexion.



1 Le tri sélectif et le recyclage des déchets domestiques, premiers gestes "citoyens" (source : mairie de Rennes).



- 2** 1. L'expansion des modes de transports alternatifs à la voiture (source : mairie de Strasbourg).
 2. Maîtriser l'étalement urbain (banlieue de Londres) ; "coulées vertes" dans les villes denses.
 3. Promouvoir "l'agriculture de proximité".
 4. Favoriser la mixité urbaine.

En 1983, l'Assemblée générale des Nations unies décide de mettre en place une Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Madame Gro Harlem Brundtland, médecin de formation, qui fut ministre de l'Environnement et plusieurs fois Premier ministre de Norvège, est désignée présidente de la Commission ; parmi les 20 autres membres, la moitié devait être ressortissante d'un pays en voie de développement (PVD).

Le rapport de cette commission (1987)¹, issu de vastes consultations menées sur tous les continents, a largement contribué à forger le concept de "développement durable". Il montre que les crises écologique, énergétique, institutionnelle, ainsi que l'écart grandissant entre pays industrialisés et PVD, constituent une même problématique, où les échelles locales, régionales, nationales et mondiales sont interdépendantes. Il recherche des solutions "réalistes", capables d'allier les préoccupations environnementales à la croissance économique, sans laquelle elles seraient "insoutenables" par l'opinion publique et politique de tout pays.

Ces propositions ont soulevé de nombreux débats : la position de la Commission en faveur d'un scénario de "basse consommation d'énergies primaires", par exemple, plutôt que la défense de l'électronucléaire, ou l'acceptation implicite du "dogme" de la croissance, ou le mythe toujours ancré de la "maîtrise" de la nature, allant de la démographie aux climats². Cependant, la grande précision des analyses de ce rapport fera de lui la base des travaux de la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (CNUED), qui se tient ensuite à Rio de Janeiro, en 1992.

30 000 participants venant de 200 pays, dont une centaine de chefs d'État ou de gouvernement : ce fut la première concertation internationale de cette ampleur. Soulignons qu'en parallèle, 5 000 ONG étaient réunies à 50 km de là, dans un "forum alternatif" qui deviendra une formule récurrente des actions de la "société civile". À ce "Sommet de la Terre", si de nombreux textes officiels ont été produits, tous n'engagent pas les signataires de la même façon. Les deux Conventions sur la biodiversité et sur le changement climatique, qui traitaient de problématiques touchant les pays aisés, ont été ratifiées par plus de 150 états. La *Déclaration de Rio*, quant à elle, n'est pas coercitive. Elle pose 27 principes³, dont quelques nouveautés comme celui de participation ou le principe de précaution.

L'*Agenda 21* est également défini à Rio : c'est un programme de 2 500 actions auxquelles chaque pays signataire s'engage pour le XXI^e siècle. La mise en œuvre de ces recommandations a ensuite fait l'objet d'une longue série d'autres conférences internationales : Sommet mondial pour le développement social à Copenhague (1995), Sommet mondial de l'alimentation à Rome (1996), Sommet des Villes à Istanbul (1996), etc.

Dix ans plus tard, au Sommet de Johannesburg (2002), les premiers bilans forcent à reconnaître que les conventions adoptées ne sont pas encore suffisantes. Le Protocole de Kyoto (1997), par exemple, qui vise à réduire les gaz à effet de serre, n'a toujours pas été ratifié par les États-Unis, considéré comme le pays le plus concerné. Ce Sommet a donc eu pour but principal de relancer la dynamique de Rio et d'engager l'ensemble des États à concrétiser davantage leurs *Agendas 21*.

1 Publié en français : Commission mondiale sur l'environnement et le développement, *Notre avenir à tous* (rapport Brundtland), Montréal : Éditions du Fleuve, 1988.

2 Ivo Rens, "Après Rio, quelles stratégies ?", Genève : revue *Sebes* (Stratégies énergétiques, biosphère et société), 1992 (cf. <http://unige.ch/sebes>).

3 Ils sont répertoriés sur le site : <http://www.environnement.gouv.fr/villedurable/textes/rio.htm>

À la suite du rapport Brundtland, qui pose l'interdépendance des problématiques mondiales, les grandes conférences internationales sur l'environnement se multiplient et les approches sont de plus en plus multisectorielle.



Le Sommet de Johannesburg organisé en 2002 (source : Ademe).

1

1972 Stockholm : Conférence des Nations unies sur l'environnement humain

Convention concernant la protection du patrimoine mondial culturel et naturel

1973 Convention sur le commerce international des espèces sauvages menacées d'extinction

1979 Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage

1982 Convention des Nations unies sur le droit de la mer

1987 Publication du rapport "Brundtland"

Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone

Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone

1989 Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontaliers de déchets dangereux

1992 Rio de Janeiro : Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (dite "le Sommet de la Terre")

Convention - cadre sur le changement climatique et les émissions de gaz à effet de serre

Convention sur la diversité biologique

Déclaration de principes relatifs aux forêts

Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement

Programme pour le XXI^e siècle : Action 21

1993 Vienne : Conférence mondiale sur les droits de l'homme

1994 Le Caire : Conférence internationale sur la population et le développement

Convention sur la lutte contre la désertification

1995 Copenhague : Sommet mondial sur le développement social

Beijing : Quatrième Conférence mondiale sur les femmes

Accord multilatéral mondial relatif aux stocks de poissons chevauchants et grands migrateurs

1996 Istanbul : Deuxième Conférence sur les établissements humains (Habitat II)

1996 Rome : Sommet mondial de l'alimentation

1997 Kyoto : protocole des objectifs de réduction de l'effet de serre pour les pays industrialisés

New-York : Sommet Planète Terre +5

1998 Procédure d'information et consentements préalables (PIC) sur les produits chimiques dangereux

2000 New York : Sommet du Millénaire

2001 Convention sur les polluants organiques persistants (POP)

Bruxelles : Troisième Conférence des Nations unies sur les pays les moins avancés

2002 Johannesburg : Conférence sur le développement durable

Monterrey : Conférence sur le financement du développement

2 Calendrier des principales conférences mondiales.

Complémentaire de la Déclaration de Rio, l'Agenda 21 (ou "Action 21", en anglais) est un programme de mise en œuvre du développement durable, conçu pour les gouvernements, les institutions et les différents acteurs économiques et sociaux. Les nations qui s'y engagent doivent le mettre en place aux niveaux national, régional et local, dès aujourd'hui mais aussi tout au long du XXI^e siècle.

L'Agenda 21 comprend 40 chapitres répartis en 4 sections. Après avoir rappelé "le principe" du développement durable ("traiter conjointement les questions d'environnement, le développement économique et la lutte contre les inégalités sociales"), le préambule souligne 4 aspects :

- l'importance d'un partenariat mondial (c'est l'idée qu'aucun pays ne peut atteindre seul l'objectif poursuivi) ;
- la nécessité d'agir sur le court terme comme sur le long terme ;
- la nécessité de mettre en place des moyens financiers nouveaux ;
- le principe de la discrimination positive envers les pays en phase de "transition" économique.

La section 1 traite des dimensions socioéconomiques : la lutte contre la pauvreté, les questions de santé, de démographie, la modification des modes de consommation, la coopération internationale et la restructuration des processus décisionnels. Il s'agit notamment de "mettre en place des mécanismes (...) pour faciliter la participation des particuliers, groupes et organismes intéressés au processus décisionnel à tous les niveaux".

Cette section contient le chapitre sur la "promotion d'un modèle viable d'établissements humains" : il plaide pour un logement adéquat pour tous, mais aussi pour une planification et une gestion durables des ressources foncières ; pour une production durable de l'industrie de la construction et pour une valorisation des ressources humaines. D'importants paragraphes promeuvent une infrastructure environnementale intégrée (eau, drainage, assainissement et gestion des déchets solides) et une politique viable de l'énergie et des transports au service des établissements humains.

La section 2 concerne la protection et la gestion des ressources naturelles, de la biodiversité et des écosystèmes fragiles (atmosphère, forêts, montagnes, océans, déserts), la gestion durable des terres agricoles et du milieu rural. Quatre chapitres sont affectés à la "gestion écologiquement rationnelle" des déchets : les déchets dangereux, radioactifs, et les substances chimiques toxiques, y compris la prévention du trafic international de ces produits ; mais aussi le traitement des déchets solides et les questions relatives aux eaux usées.

La section 3 traite du rôle des différents groupes ou acteurs : les femmes, les enfants, les communautés régionales, les populations autochtones, les ONG, les travailleurs, les agents économiques, les chercheurs, les collectivités locales (villes, municipalités, communes, etc.). Tout le chapitre 28, auquel les collectivités locales représentées au Sommet de Rio ont largement contribué, est consacré à inciter toutes les échelles locales à concevoir un *Agenda 21* pour leur propre territoire, en coopération avec les habitants, les organisations locales et les entreprises.

Enfin, la section 4 rassemble des recommandations sur les moyens d'exécution : ressources financières, moyens technologiques et scientifiques, éducation, formation et information, mécanismes institutionnels ou juridiques nationaux et internationaux¹.

¹ <http://www.environnement.gouv.fr/villedurable/textes/action21.htm> et <http://www.agora21.org/bibliotheque.html>

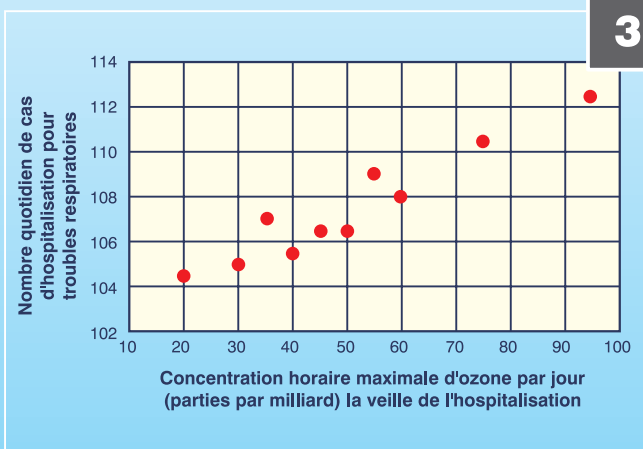
L'Agenda 21 (ou Action 21) est un guide qui liste les objectifs à atteindre au XXI^e siècle dans les trois pôles du développement durable. Les nations qui s'y engagent doivent l'appliquer aux niveaux national, régional et local.



Page de garde de l'Agenda 21. **1**



1 2
3 4



- 2** 1. Transports : le dossier *Transvilles* (Agenda 21 de Valenciennes, Fr.).
 2. Énergies (Agenda 21 de Coburg, All.).
 3. Santé publique : Action 21 au Canada.
 4. Environnement : mesure des niveaux de pollution (Agenda 21 de Nancy, Fr.).

Les premières actions communautaires en faveur de l'environnement, qui ont débuté en 1972, reposaient sur une approche verticale et sectorielle des problèmes écologiques, qui consistaient essentiellement à limiter la pollution, par l'introduction de normes minimales, notamment en matière de gestion des déchets, de pollution de l'eau et de l'air.

L'Acte unique européen (1987) instaura, dans le traité instituant la Communauté européenne, un titre spécifique à l'environnement. Le traité de Maastricht (1992) y a ensuite introduit la "croissance durable" comme objectif politique majeur, et le traité d'Amsterdam (1996) y a explicitement imposé l'intégration de la protection de l'environnement dans toutes les autres politiques de l'Union.

La législation européenne reconnaît par ailleurs, les "grands principes" du développement durable, définis dans la Déclaration de Rio. Le principe de précaution (n° 15), selon lequel "l'absence de certitudes scientifiques, en cas de risque de dommages graves ou irréversibles, ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement". Le Conseil d'État (France) s'y est notamment référé dans sa décision de suspendre momentanément l'autorisation de mise sur le marché de certains maïs "transgéniques".

Le principe de participation (n° 10), est introduit au niveau européen par la convention d'Aarhus (1998). Il pose que chacun doit avoir accès aux informations relatives à l'environnement, y compris relatives aux substances et activités dangereuses (ce qui est inscrit dans le Code de l'environnement français) mais il garantit aussi la participation du public aux processus décisionnels, et l'accès aux recours juridiques, en matières d'environnement.

Le principe de l'action préventive pose que l'on agisse en priorité à la source des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économique acceptable : s'attaquer à la réduction de la production de déchets par exemple, plutôt que chercher comment s'en débarrasser ensuite. Enfin, le principe du "pollueur-payeur", s'il était déjà défini en 1972, s'est progressivement généralisé, même si aucune éco-taxe n'est encore imposée au niveau européen.

Le principe de subsidiarité, quant à lui, faisait déjà l'objet de l'article 5 du traité de la Communauté européenne¹ : "dans les domaines qui ne relèvent pas de sa compétence exclusive, la Communauté n'intervient que si, et dans la mesure où, les objectifs de l'action envisagée ne peuvent pas être réalisés de manière suffisante par les États membres et peuvent donc, en raison des dimensions ou des effets de l'action envisagée, être mieux réalisés au niveau communautaire." Plus généralement, le principe de "subsidiarité active"² suggère qu'aucune réponse ne peut être trouvée à un seul échelon : il prône donc l'articulation et l'échange d'expériences entre communautés de base pour définir en commun des obligations de résultats.

Il est important de souligner, néanmoins, que ces principes ont une portée juridique réduite, très dépendante de la jurisprudence : il ne s'agit pas (ou pas encore) de "droits fondamentaux" pour le citoyen mais plutôt de guides pour les décideurs, à interpréter en permanence³.

1 Textes européens sur <http://europa.eu.int/scadplus/leg/fr/s15000.htm> et <http://www.agora21.org/bibliotheque.html>

2 Glossaire par Ch. Brodhag : http://www.agora21.org/dd/glossaire-dd_court.doc

3 Cf. Simon Charbonneau, "Le cadre juridique du développement durable", *Bulletin de la Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme* n° 37, oct. 2001, p. 8 à 11.

L'objectif de développement durable a été progressivement introduit dans les textes instituant l'Union européenne. Il implique d'intégrer la protection de l'environnement dans toutes les autres politiques de l'Union.

- ☞ le principe de précaution
- ☞ le principe de l'action préventive
- ☞ le principe de participation
- ☞ le principe du pollueur-payeur
- ☞ le principe de subsidiarité

Les grands principes du développement durable. **1**

Article premier

Par le présent traité, les HAUTES PARTIES CONTRACTANTES instituent entre elles une COMMUNAUTE EUROPÉENNE.

Article 2

La Communauté a pour mission, par l'établissement d'un marché commun, d'une Union économique et monétaire et par la mise en œuvre des politiques ou des actions communes visées aux articles 3 et 4, de promouvoir, dans l'ensemble de la Communauté, un développement harmonieux, équilibré et durable des activités économiques, un niveau d'emploi et de protection sociale élevé, l'égalité entre les hommes et les femmes, une croissance durable et non inflationniste, un haut degré de compétitivité et de convergence des performances économiques, un niveau élevé de protection et d'amélioration de la qualité de l'environnement, le relèvement du niveau et de la qualité de vie, la cohésion économique et sociale et la solidarité entre les États membres.

Article 6

Les exigences de la protection de l'environnement doivent être intégrées dans la définition et la mise en œuvre des politiques et actions de la Communauté visées à l'article 3, en particulier afin de promouvoir le développement durable.

2 Extraits du traité instituant la Communauté européenne (Amsterdam - 2 octobre 1997).

Pour répondre à ses enjeux colossaux, le développement durable implique de réels changements structurels dans les domaines économique, social et politique. Il requiert la mise en place d'institutions intersectorielles et de mécanismes participatifs associant dans les décisions, non seulement toutes les échelles des pouvoirs publics, mais aussi la société civile et le secteur privé. C'est donc également à un bouleversement dans les méthodes de travail et de gouvernement que le "développement durable" appelle. L'idée de base est que l'État n'est pas seul responsable du développement, que celui-ci est du ressort de la société toute entière. Cela implique d'abandonner des processus de décision fixes, centralisés, pour évoluer vers d'autres mécanismes : recourir à des arbitrages, gérer des conflits de priorité, mobiliser des processus de concertation et de négociation.

"L'approche stratégique" fait partie de ces nouvelles méthodes¹. Il s'agit d'identifier des objectifs explicites et de proposer des moyens pour y arriver. Ce "plan d'action" doit intégrer la mise en place de systèmes flexibles d'amélioration continue de la gestion des affaires publiques. L'approche est donc conçue en fonction des résultats des actions (les impacts) et non des actions elles-mêmes, en un processus cyclique de "gestion du progrès".

Cependant, ces processus admettent un flou parfois perturbant entre "objectifs", "intentions" et "engagement", ou entre "propositions", "mesures", et "actions". Si les principes de feed-back, de participation, d'élaboration progressive des objectifs sont séduisants, voire nécessaires en l'absence de certitudes, il ne faut pas sous-estimer certains risques : absence de décision faute de décideur ou au contraire, par dissolution des responsabilités ; difficulté de cerner "l'intérêt général" et non celui des acteurs en présence, manque de visibilité de mesures concrètes sur les facteurs mis en cause.

Ainsi, dans la *Stratégie de l'Union européenne en faveur du développement durable*², adoptée par le Conseil européen (Göteborg, juin 2001), on peut être surpris que même les "actions" ne consistent qu'à "encourager le recours à", "exploiter le potentiel de", "inviter les entreprises à", "proposer que" et à produire de constants "rapport d'évaluations".

Ce document explicite notamment que la Commission axera ses actions sur "un petit nombre de problèmes présentant une menace grave ou irréversible pour le bien-être futur de la société européenne". Il définit donc ce qui est pour l'Union, "les principaux adversaires du développement durable" (soit ici encore des "objectifs", mais à combattre). Citons : les émissions de gaz à effet de serre ; les souches résistantes aux antibiotiques ; les atteintes à la sécurité alimentaire ; la pauvreté et l'exclusion sociale ; le vieillissement de la population ; la perte de biodiversité ; l'augmentation du volume de déchets, "plus rapide que celle du PIB" ; les encombrements routiers ; la dégradation des centres villes ; l'extension des banlieues ; les déséquilibres régionaux existant dans l'Union européenne.

Pour réaliser ces objectifs, la commission propose "une stratégie communautaire en trois parties" constituée, à nouveau, de "grands objectifs", de "propositions et recommandations couvrant plusieurs domaines afin d'améliorer l'efficacité des politiques" ; et enfin, de "mesures spécifiques" afin de traiter les obstacles les plus importants à la réalisation du développement durable en Europe ; ainsi que les mesures visant à mettre en œuvre et surveiller les progrès réalisés (c'est-à-dire, le processus d'évaluation et d'adaptation).

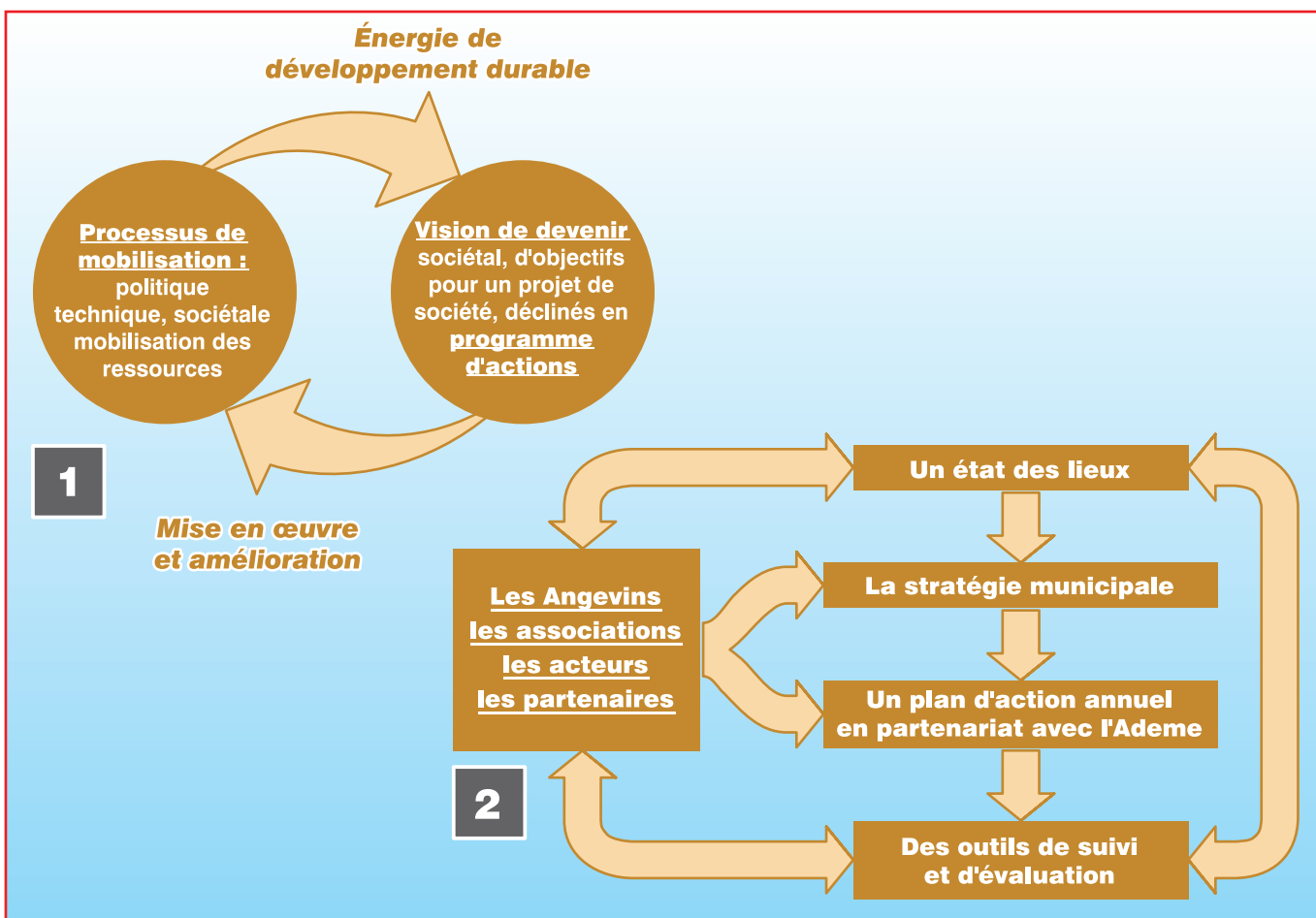
¹ OCDE, *Guide pratique pour les stratégies de développement durable*, 2001.

² Texte : http://europa.eu.int/eur-lex/fr/com/cnc/2001/com2001_0264fr02.pdf

La stratégie européenne de développement durable correspond à une vision de devenir, traduite en programme d'actions et en processus de mobilisation dans une démarche cyclique d'amélioration continue.

- ☞ Une démarche centrée sur les besoins humains
- ☞ Une ambition à long terme largement partagée
- ☞ Un engagement politique fort, à haut niveau et des institutions influentes
- ☞ Une volonté de construire sur l'existant
- ☞ Des dispositifs de suivi, de mise à profit de l'expérience et d'évaluation
- ☞ Un processus :
 - global et intégré
 - ciblé assorti de priorités budgétaires précise
 - guidé par une analyse complète et fiable
 - dirigé par le pays et pris en main au niveau national
 - réellement participatif
 - qui assure la liaison entre niveau national et local
 - qui s'appuie sur les compétences existantes et les valorise

1 Principes essentiels auxquels doivent obéir les stratégies de développement durable (OCDE 2001).



2 1. Processus cyclique proposé dans la "stratégie européenne".
 2. L'Agenda 21 d'Angers : un exemple appliqué.

La politique européenne procède de livres verts (consultations) en livres blancs (propositions) puis en programmes d'actions. On a vu qu'elle avait pour tâche moins de réglementer à grande échelle que d'inciter à l'échelle locale, et qu'elle traite plus généralement d'objectifs que de moyens.

La plus grande difficulté semble être de passer d'une approche "sectorielle" de l'environnement à une approche dite "intégrée". Si d'un côté le 5^e programme d'action pour l'environnement (1992-2000) avait précisément pour but d'initier des actions communautaires "horizontales", tenant compte de multiples facteurs (industrie, énergie, tourisme, transports, agriculture), il est significatif de constater que le site Internet de l'Europe est toujours structuré par secteurs et qu'on n'y trouve pas le développement durable sur le même plan que les autres : c'est un sous-chapitre de "Environnement".

Par contre, on peut trouver dans les catégories "transports", "énergie", ou "emploi" les directives qui traitent de l'intégration de la protection de l'environnement dans ces secteurs (imposée par le traité d'Amsterdam, 1996). L'association des trois pôles du développement durable n'est donc encore dans les faits qu'une somme de liens binaires, que chaque domaine établit avec l'environnement. Par contre, il semble que dans ce cadre plus restreint, des moyens concrets de mise en œuvre peuvent être formulés, même si c'est toujours sous forme de "propositions".

Ainsi, dans le domaine des transports, un livre blanc a été adopté en septembre 2001, présenté comme "la première contribution concrète à la stratégie de développement durable arrêtée à Göteborg", reprenant près de 60 mesures. La première vise à effectuer "un rééquilibrage modal à l'horizon 2010, grâce à une politique active de revitalisation du rail, de promotion des transports maritime et fluvial et de développement de l'intermodalité". Et dans la partie "Vers une mobilité durable", on lit : "la commission met en place une panoplie de mesures d'envergure : le développement d'une tarification juste des infrastructures – prenant en compte les coûts externes et encourageant l'utilisation de transports les moins polluants ; la définition de zones sensibles pouvant bénéficier de financements supplémentaires en faveur de transports alternatifs, etc.

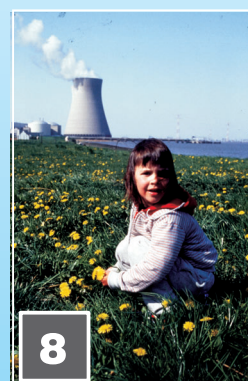
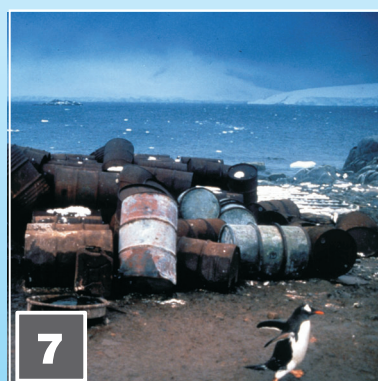
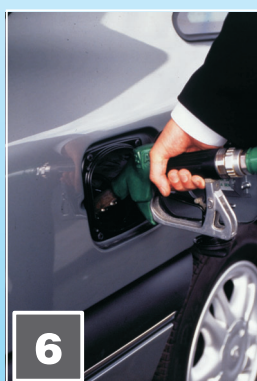
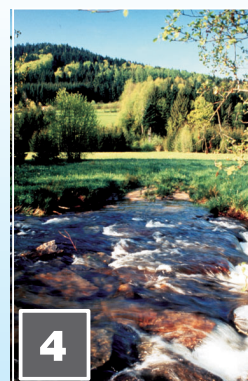
La "politique énergétique communautaire en faveur de l'intégration de la dimension environnementale" fixée en 1998, faisait partie des objectifs prioritaires du secteur énergétique, avec la compétitivité et la sécurité d'approvisionnement. Pour cela, elle propose des mesures qui demandent "un effort particulier" aux autres institutions également, telles que : faciliter l'échange d'information et le partage des analyses ; développer des actions contribuant à augmenter l'efficacité énergétique, à promouvoir l'utilisation des sources renouvelables, ou la production combinée de chaleur et d'électricité (cogénération) ; et mettre en place des indicateurs permettant de suivre les progrès réalisés en matière d'intégration environnementale.

Enfin, dans la rubrique "Environnement", on trouve comme moyen mis en œuvre, le programme LIFE (l'Instrument financier pour l'environnement) ainsi que des instruments techniques : le label écologique, le système communautaire de management environnemental et d'audit, le système d'évaluation des projets publics et privés sur l'environnement, et les critères applicables aux inspections environnementales dans les États membres. On trouve aussi l'Agence européenne pour l'environnement qui collecte et diffuse des informations comparables dans le secteur de l'environnement. Ses fonctions, à nouveau, sont uniquement consultatives mais ses travaux sont de plus en plus déterminants lors de l'adoption de nouvelles mesures.

Le développement durable ne fait pas partie des “activités” de l’Union européenne ; mais chaque secteur isolé étudie les moyens pour “intégrer l’environnement” dans ses objectifs.

- ☞ Agriculture
- ☞ Aide humanitaire
- ☞ Audiovisuel
- ☞ Budget
- ☞ Commerce extérieur
- ☞ Concurrence
- ☞ Consommateurs
- ☞ Culture
- ☞ Développement
- ☞ Douanes
- ☞ Économie et monnaie
- ☞ Éducation, formation, jeunesse
- ☞ Élargissement
- ☞ Emploi et politique sociale
- ☞ Énergie
- ☞ Entreprises
- ☞ Environnement
- ☞ Fiscalité
- ☞ Fraude
- ☞ Justice et affaires intérieures
- ☞ Marché intérieur
- ☞ Pêche
- ☞ Politique étrangère et sécurité
- ☞ Politique régionale

Les “activités” répertoriées de l’Union européenne (source : http://europa.eu.int/index_fr.htm).



2 1. L'énergie éolienne. 2. Les usines. 3. Les environs d'une ville. 4. L'eau pure et claire. 5. La sécheresse. 6. L'essence sans plomb. 7. L'Antartique. 8. Centrale nucléaire (source : médiathèque de la Commission européenne sur le thème “environnement”).

En 1990, les Nations unies créent le Conseil international pour les initiatives locales en environnement (ICLEI), destiné à sensibiliser toutes les collectivités locales au développement durable et à soutenir la constitution d'un réseau de villes œuvrant dans ce but. La même année, la Commission européenne crée un groupe d'experts sur l'environnement urbain : un expert par pays et des représentants des différentes institutions, patronales, syndicales, universitaires, des représentants de villes, et des observateurs de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique), de l'OMS (Organisation mondiale de la santé), du Conseil de l'Europe¹.

À l'initiative de quelques villes, s'est organisée la première "Conférence européenne sur les villes durables" (Aalborg, 1994) où ce groupe d'experts a présenté son premier rapport. Elle déboucha sur la rédaction et la signature d'une "charte des villes européennes pour un développement durable". Le document marque leur engagement vers la "durabilité" et leur volonté de faire campagne pour l'établissement d'Agendas 21 locaux : il s'agit de construire une justice sociale, des économies durables et un environnement viable ; de défendre la négociation comme méthode de résolution des problèmes, une mobilité urbaine et un aménagement du territoire durables, la prévention de l'intoxication des écosystèmes, l'autogestion et la participation de la collectivité au plan local. Il s'agit aussi d'être conscient des conséquences mondiales des choix locaux : "agir local, penser global".

C'est également à Aalborg que la Commission européenne a lancé la "Campagne des villes durables européennes - CCRE", dans le but de fédérer des réseaux de villes existants (CCRE, ICLEI, Eurocités, le réseau des villes-santé de l'OMS ou la Fédération mondiale des cités unies). C'est un moyen pour soutenir les collectivités dans leurs processus Agendas 21 locaux et pour tirer profit des enseignements des expériences de terrain pour orienter sa politique. En 1995, plus de 500 collectivités locales avaient adhéré à ce réseau. L'Europe accorde aussi un soutien financier (Urban I et II) à des projets, conduits dans des quartiers défavorisés, d'intégration à long terme.

En 1996, la deuxième Conférence européenne des villes durables (Lisbonne) cherchait à formuler les mises en œuvre possible d'un Agenda 21 local. Car bien que le ralliement à la charte d'Aalborg soit important, les collectivités locales se montraient encore "attentistes" et peu engagées dans l'opérationnel. En 1996 également est publié le rapport final "Villes durables européennes" du groupe d'experts européens. Il recommande une approche "écosystémique" à l'égard de l'environnement urbain et l'élaboration de systèmes de gestion urbaine "intégrée", rapportés à quelques domaines-clés.

Mais face à la complexité de ces enjeux (ressources naturelles, énergie et déchets, politique économique et sociale, planification spatiale, mobilité et régénération urbaine, consommations, etc.), et celle des changements de processus attendus, on peut s'interroger sur leur réelle compatibilité² : les quartiers écologiques sont-ils aussi sociaux ? Les temporalités longues sont-elles celles de la participation ? Le développement local ne crée-t-il pas un repli identitaire ? Peut-on densifier les villes sans sacrifier l'accès à la nature ? Ces contradictions en réalité sont inscrites dans les objectifs mêmes du développement durable, et c'est son enjeu précisément de les gérer.

1 Cf. Nediakka Sougareva et Nathalie Holec, *L'histoire des villes durables européennes*, sur le site : <http://www.ecologie.gouv.fr>

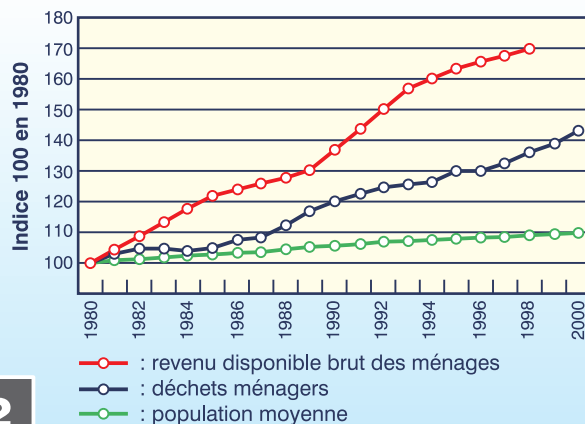
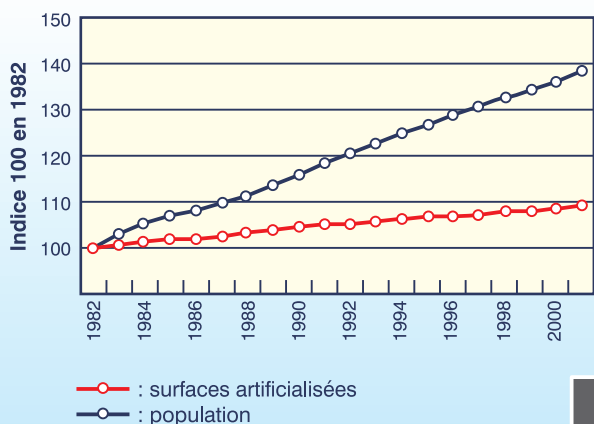
2 Cf. Jacques Theys, Cyria Emelianoff, "Les contradictions de la ville durable", *Développement durable, villes et territoires - Innover et décloisonner pour anticiper les ruptures*, note n° 13 du Centre de Prospective et de Veille Scientifique, DRAST, avril 2000.

Sous l'instigation d'organismes internationaux (ONU, Europe...), des villes se regroupent pour réfléchir sur les moyens de mettre en œuvre localement les principes du développement durable.

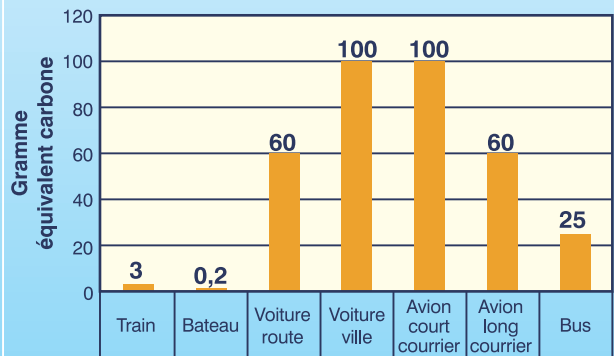
Pour préparer nos plans d'action locaux, nous suggérons de procéder de la manière suivante :

- ☞ tenir compte des méthodes de planification et des mécanismes financiers existants ;
- ☞ identifier les problèmes par une consultation du public ;
- ☞ classer les actions par ordre de priorité ;
- ☞ évaluer les stratégies alternatives de développement ;
- ☞ établir un plan local d'action à moyen et à long terme, qui comportera des objectifs mesurables ;
- ☞ planifier la mise en œuvre du plan, en préparant un calendrier et en précisant les responsabilités attribuées à chacun des partenaires ;
- ☞ mettre en place des systèmes et des procédures d'évaluation et de compte-rendu sur la mise en œuvre du plan.

Extraits de la charte d'Aalborg. **1**



1 **2**
3



- 1** Évolution des surfaces artificialisées et de la population (source : INSEE).
- 2** Évolution du revenu et des modes de consommation des ménages (source : INSEE).
- 3** Émissions de gaz à effet de serre (en gramme équivalent carbone) liées au transport d'un passager sur 1 km (d'après J.M. Jancovici).

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

2 Les problématiques liées aux villes sont centrales pour le développement durable.

Le développement durable s'applique particulièrement au milieu urbain : d'abord parce que les villes, et leurs activités de production, sont une source importante des nuisances en cause, mais aussi parce qu'elles sont le lieu par excellence de l'exercice de la citoyenneté et de la solidarité¹. Aussi, les collectivités locales ont-elles "la charge de mettre la première pierre à l'édifice", car "elles jouent, au niveau administratif le plus proche de la population, un rôle essentiel dans l'éducation et la mobilisation du public en faveur d'un développement durable" (chap. 28 de l'Agenda 21).

C'est aussi parce que de plus en plus d'experts considèrent que les solutions techniques sont maintenant insuffisantes pour gérer les problèmes environnementaux (comme l'effet de serre), qu'il faut dépasser les outils classiques de l'écologie et de la planification publique, pour agir sur l'évolution des villes : formes urbaines, pratiques de décision et usages de l'espace.

Les Agendas 21 locaux ne doivent donc pas "se greffer" sur une politique préalable, mais au contraire se définir en fonction des situations existantes, des besoins, de la volonté des *acteurs* locaux et de leurs priorités. On relève ici une des contradictions exprimées par Jacques Theys : celle d'objectifs politiques "descendants", incités par l'Europe, relayés par le national, mais que l'on souhaiterait voir revendiqués, et donc légitimés, par "le local". Une autre mise au point est de préciser que "la ville durable est un projet, un horizon, vers lequel on doit tendre, mais qu'on ne peut réaliser in extenso. Une "ville durable" (...) est d'abord un cadre où prennent sens des projets collectifs"².

Comment alors considérer l'ensemble des systèmes urbains (sociaux, économiques, politiques) dans leurs évolutions intriquées et dans leurs interactions dynamiques, et non faire la somme d'objectifs différents ? Camagni *et al.*³ étudient les principes qui régulent différents sous-systèmes et cherchent à les intégrer pour atteindre une efficacité "allocative" de long terme, une efficacité "distributive" et une équité environnementale. Ces objectifs ne sont donc pas ceux que chaque domaine isolé se serait défini, ils correspondent à la prise en compte de l'ensemble.

Reste que, comme la charte d'Aalborg l'indique, "chaque ville étant différente, c'est à chacune de trouver son chemin afin de parvenir à la durabilité". Aussi trouve-t-on de plus en plus de réseaux d'informations sur internet, visant à partager des expériences⁴ : la base de données du site ICLEI, celle de UN-Habitat⁵, ou d'autres plus spécifiques⁶, sans compter les nombreuses publications explicatives. Si la plupart des agendas locaux initient des formes de concertations avec différents groupes d'acteurs (associations d'intérêts, entreprises, collectivités), on peut remarquer que le volet social reste souvent de l'ordre du souhait - mis à part la création d'emplois suscitée par certains programmes de l'agenda - et regretter que la "démarche qualité" des villes durables, dans le contexte de compétitivité croissante des territoires et de leur "image", contribue plutôt à élever les standards de vie, donc les coûts fonciers, locatifs, etc.

1 *Villes et développement durable. Des expériences à échanger*, Paris : Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, juin 1998.

2 Cf. Cyria Emelianoff : <http://www.environnement.gouv.fr/villedurable/intro/emelia.htm>

3 Roberto Camagni, Maria Cristina Gibelli (dirs.), *Développement urbain durable. Quatre métropoles européennes*, La Tour d'Aigues : éd. de l'Aube, 1997.

4 Par exemple : Institut national du Génie urbain, Bernard Ascher et Dominique Drouet (coord.), *La ville et l'environnement. 21 expériences à travers le monde*, Paris : Polytechnica, 1994.

5 Liste d'études de cas sur le site de ICLEI (International Council for Local Environment Initiatives) : <http://www3.iclei.org/egpis/> ainsi que sur le site des Nations unies (UN-Habitat) : <http://www.bestpractices.org/>.

6 www.energie-cites.org ; www.planetecologie.org ; www.agora21.org ; www.cites21.org, etc.

Si les objectifs du développement durable concernent particulièrement les villes, c'est à l'échelle des collectivités locales qu'il faut mettre en place les moyens pour les intégrer.

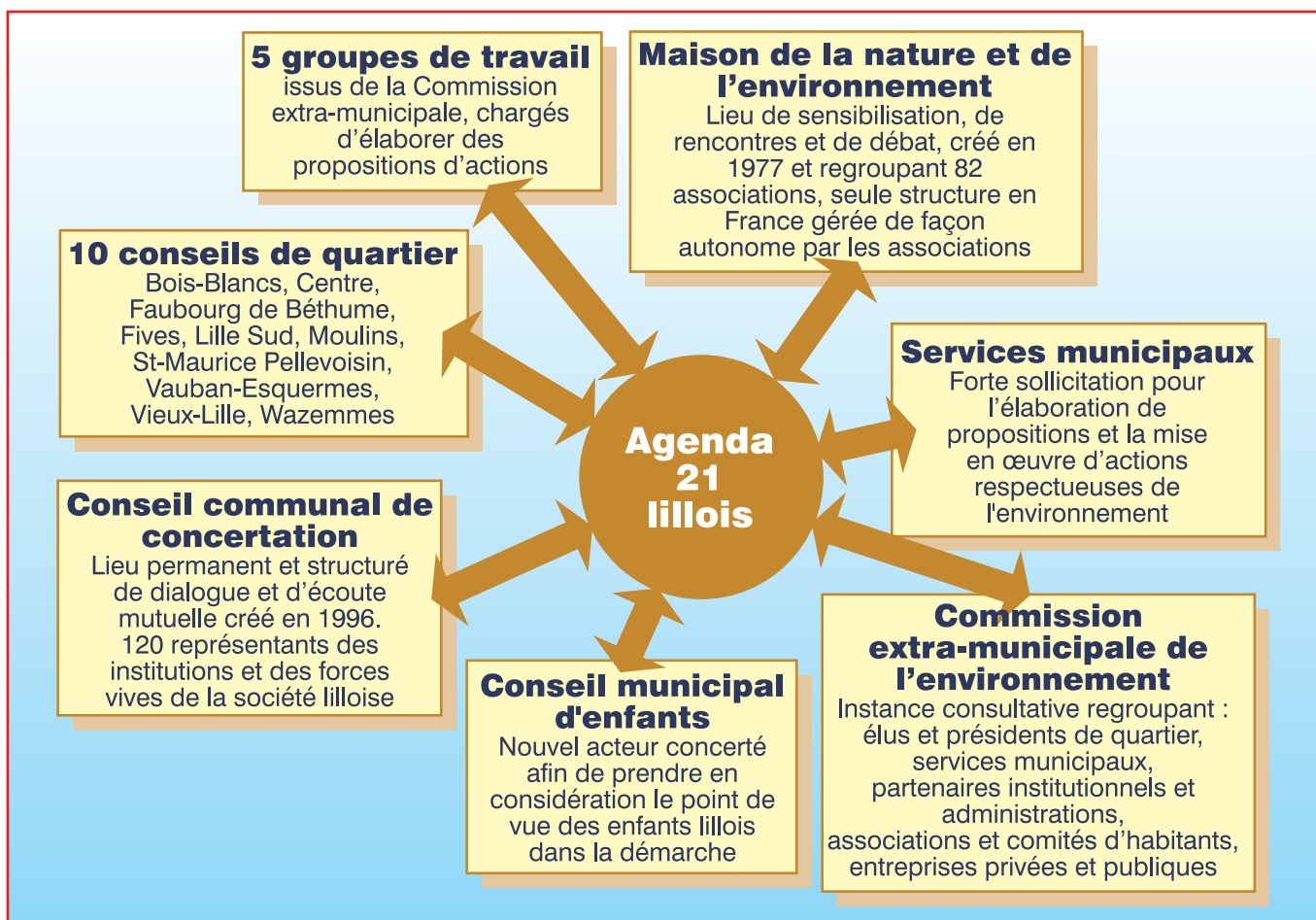
5. C'est une initiative citoyenne et collective.

VRAL. La mobilisation de la société civile est l'élément moteur d'un Agenda 21 local. Celui-ci initie le dialogue entre des acteurs aux logiques diverses (citoyens, entreprises, commerçants, associations...), qui vont négocier des objectifs communs pour un développement durable de leur territoire. Les acteurs locaux doivent être consultés lors des différentes phases d'élaboration d'un Agenda 21 local et leurs propositions sont débattues. Certains d'entre eux peuvent s'investir directement dans la réalisation d'actions de ce programme.

6. Les enjeux sont abstraits pour la collectivité.

FAUX. La mise en place d'un Agenda 21 local se traduit rapidement par des avancées concrètes. C'est un moment privilégié dans la vie d'une collectivité pour recenser l'ensemble de ses politiques publiques puis de les mettre en cohérence autour d'un programme local de développement durable. Il induit une meilleure coopération entre les services communaux bien souvent cloisonnés. Par ailleurs, c'est une chance pour la collectivité de développer le dialogue avec l'ensemble des citoyens et acteurs sur son territoire, de redonner de la valeur à l'action publique et d'impulser la prise de conscience d'une nécessaire responsabilité de chacun.

Extraits du guide *Territoires et développement durable* - Comité 21
(source : <http://www.comite21.org>).



2 Exemple de processus de participation (Agenda 21 de Lille).

Devant l'ampleur et la complexité des domaines couverts par les objectifs du développement durable, la demande de critères concrets, opératoires et mesurables qui le représentent est grande. La Commission du développement durable des Nations unies tout d'abord, a lancé en 1990 un ensemble de 134 indicateurs de développement durable (IDD), classés comme les chapitres de l'Agenda 21: ils sont divisés en quatre catégories (économie, social, environnement, institutions). L'Europe s'est surtout attachée à évaluer la disponibilité des informations et la faisabilité des critères d'évaluations¹. Elle a choisi dans un premier temps un ensemble de 10 indicateurs (5 de base et 5 optionnels), dont l'objectif est plus de mesurer les progrès d'une ville dans le temps que de les comparer entre elles.

Plusieurs pays sont chargés de tester les 134 indicateurs, mais cherchent aussi à en réduire le nombre et à les "intégrer" dans un système multidimensionnel (social-économique-écologique), problématique essentielle du développement durable. Les difficultés pour construire un tel système sont grandes : quantité des domaines, hétérogénéité des données, diversité des niveaux de décisions à prendre en compte. Il doit aussi être apte à mettre en relief des dynamiques d'évolution, et s'axer sur la connaissance des stocks (capitaux, fonds, potentialités, richesses, vulnérabilités), ce qui le distingue des indicateurs environnementaux classiques², qui sont principalement centrés sur les flux (revenus, productions, consommation, prélèvements).

Un classement généralement utilisé est le modèle de l'OCDE : les "indicateurs de pression" que les activités humaines exercent sur l'environnement (ex. : taux de CO₂ dans l'air) ; les "indicateurs d'état", de la situation environnementale (ex. : concentration de nitrates dans les rivières) ; et les indicateurs de réponse, qui évaluent les efforts consentis pour résoudre un problème (ex. : financements destinés à la dépollution des sols)³.

Si les informations à collecter (statistiques et scientifiques) sont encore dispersées, que les dispositifs d'enquête et d'observation doivent être améliorés, c'est leur "intégration" qui constitue la difficulté intrinsèque du développement durable. Souvent traduite par une simple juxtaposition d'indicateurs (économiques, environnementaux et sociaux), plusieurs initiatives recherchent comment l'améliorer, via notamment la construction de systèmes de pondération des différents indicateurs pris en compte⁴.

En France, l'IFEN⁵ cherche à créer une "structure intégrée modulable", qui soit un cadre méthodologique de référence, où l'on puisse impliquer les acteurs dans un processus d'élaboration et générer des indicateurs chiffrés, clairement situés dans un "schéma" général. Cinq grands axes, caractéristiques de la durabilité telle que définie dans le rapport Brundtland, structurent ainsi les modules : une croissance équilibrée (module 1), l'entretien et la restauration des "capitaux critiques" (2 et 3), l'articulation entre le local et le global (4 et 5), la réduction des inégalités (conception objective) et les insatisfactions (conception subjective) pour les générations présentes (6 et 7), et la prise en compte des générations futures notamment par l'application du principe de précaution (8 et 9).

1 <http://europa.eu.int/scadplus/leg/fr/lvb/l28127.htm>

2 Cf. Jacques Theys, "Vers des indicateurs de développement durable", note n° 13 du Centre de Prospective et de Veille Scientifique (CPVS), op. cit.

3 Le schéma complet : D-P-S-I-R (Driving forces - Pressure - State - Impact - Response).

4 Cf. les travaux de la "Plate-forme Indicateurs pour un Développement Durable", mise en place par le département scientifique fédéral belge : http://www.belspo.be/platformisd/Frans/Contact_fr.htm

5 Cf. *Étude et travaux*, n° 35 de l'IFEN (Institut français de l'environnement), "Propositions d'indicateurs de développement durable pour la France" (nov. 2001), disponible sur le site www.ifen.fr, rubrique publications.

Face à la demande de critères concrets mesurables du développement durable, deux démarches coexistent : lister les indicateurs opératoires disponibles ou imaginer une démarche permettant à chaque acteur de se construire son ensemble d'indicateurs pertinents.

INDICATEURS DE BASE (obligatoire) :

- ☞ Degré de satisfaction du citoyen à l'égard de la collectivité locale
- ☞ Effets de l'activité humaine au niveau local sur les évolutions climatiques globales
- ☞ Mobilité locale et modes de transports (pour l'ensemble des habitants)
- ☞ Proximité des espaces verts, des espaces publics et de services quotidiens
- ☞ Qualité de l'air (extérieur)

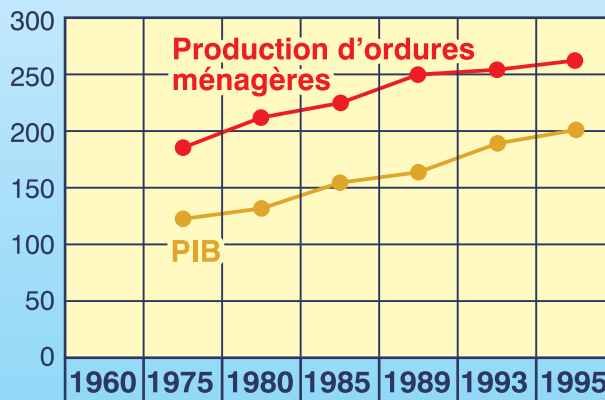
AUTRES INDICATEURS (non obligatoire) :

- ☞ Modes de transport des enfants scolarisés
- ☞ Modes de gestion des pouvoirs et des entreprises de niveau local s'exerçant en accord avec les principes de développement durable
- ☞ Pollution liée au bruit
- ☞ Occupation de l'espace dans une optique de développement durable
- ☞ Produits ayant obtenu une certification concernant leur durabilité

Les indicateurs européens (2002). **1**

1. Efficacité de l'appareil productif
2. Prélèvements et pollutions critiques
3. Gestion patrimoniale du "capital critique"
4. Répartition et inégalités spatiales
5. Globalisation et gouvernance
6. Accès aux revenus, services et patrimoines, inégalités et exclusions
7. Satisfaction, préférences, engagement, politiques et gouvernance
8. Principes de responsabilité et de précaution
9. Résilience, adaptabilité, flexibilité, développement de la réactivité

1



2

- 2** 1. Approche française pour la construction d'indicateurs de développement durable : une structure en 9 modules (IFEN, 1999).
2. Un exemple d'indicateurs couplés.

1) Un développement est durable s'il préserve un **stock** de capital productif suffisant pour que les générations futures puissent subvenir à leurs besoins. Différentes formes de capital interviennent dans le processus de création de richesses : le capital produit (manufacturé), le capital naturel (renouvelable ou non), le capital humain (connaissances, savoir-faire, mais aussi état nutritionnel et santé de la population) et le capital social (réseaux de coopération, circulation de l'information, facilité de transactions, etc.)¹.

2) La **capacité de charge** désigne traditionnellement le nombre d'animaux qu'un territoire peut tolérer sans que les ressources végétales ne soient dégradées ; on s'efforce aujourd'hui de promouvoir le développement dans les limites de la "capacité de charge" des écosystèmes².

3) Certains **capitaux** ou patrimoines naturels sont dits "**critiques**", dans la mesure où leur disparition (ou leur forte détérioration) serait susceptible de nuire au maintien ou au développement d'une activité, ou constituerait une perte collective irréparable pour les générations futures. On peut considérer comme "critiques" les capitaux, ressources ou patrimoines naturels qui possèdent les trois caractéristiques suivantes³ :

- ils ont une importance vitale ou "stratégique" pour le développement d'une activité donnée, ou pour l'ensemble de la collectivité ;
- ils ne sont pas substituables (ou substituables mais à un coût très élevé) ;
- ils sont réellement ou potentiellement menacés (à moyen terme).

4) La durabilité est dite **faible** quand elle postule qu'un développement qui prend en considération les trois dimensions (économique, environnementale et sociale) sera forcément durable. La durabilité **forte** requiert **des conditions de durabilité pour chacune des dimensions** : elle exige notamment la conservation du capital total ET du capital naturel critique, celui-ci visant la conservation d'au moins ce qui existe aujourd'hui. La durabilité faible exige la conservation du capital total, mais est indifférente à l'égard de la composition des richesses transmises. On peut donc substituer une richesse (naturelle) par une autre (économique, par exemple) du moment que le capital total est conservé. Le Protocole de Kyoto est un exemple de durabilité faible, puisqu'en réalité, il définit les "quotas" de pollution de chaque pays, et organise le commerce des "permis de polluer".

5) L'intégration des trois dimensions (économique, environnementale et sociale) pour dépasser le simple collage, demande une modification profonde de leurs objectifs traditionnels respectifs⁴, en les faisant passer :

- de la rentabilité économique à court terme, à l'**efficacité allocative** à long terme : il s'agit "d'internaliser" les coûts sociaux dans les prix et de tenir compte tant des avantages futurs qu'immédiats ;
- de la recherche de l'égalité, à celle d'une **efficacité distributive**, qui permet au plus grand nombre de jouir des avantages produits ; l'**équité** se différencie ici de l'**égalité** quand il s'agit de donner à chacun non pas le même résultat mais les mêmes possibilités ; et de se donner comme objectif la maximisation non de la moyenne des extrêmes, mais du minimum garanti⁵ ;
- de la stricte conservation écologique, à l'**équité environnementale** : plutôt que produire de la "nature", en garantir l'accès au plus grand nombre.

1 Cf. "Mesurer le développement durable en Belgique : quels rôles pour les processus participatifs ?", sur le site du Conseil fédéral du développement durable, <http://www.frdo-cfdd.be/fr/pubfr/pubfr.htm>, rubrique publications.

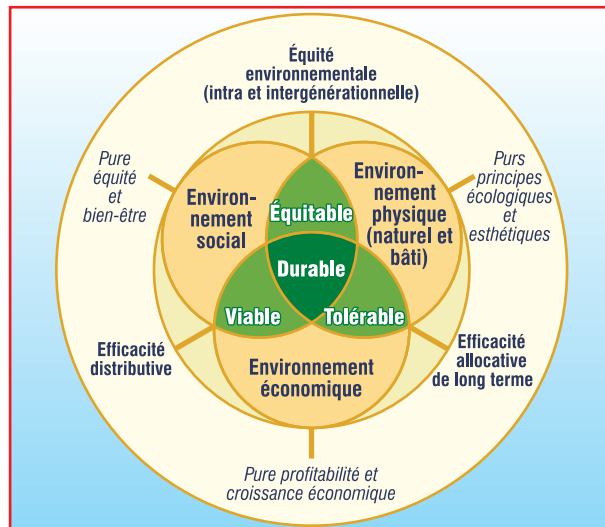
2 Christian Brodhag (ENMSE), *Glossaire*, sur le site www.agora21.org, rubrique bibliothèque.

3 Jacques Theys, "Vers des indicateurs de développement durable", note n° 13 du Centre de Prospective et de Veille Scientifique (CPVS), DRAST, avril 2000.

4 Roberto Camagni, Maria Cristina Gibelli (dirs.), *Développement urbain durable. Quatre métropoles européennes*, La Tour d'Aigues : éd. de l'Aube, 1997, p.13.

5 Philippe Van Parys, conférence org. par la chaire d'éthique économique et sociale, LLN, déc. 2001.

La réflexion sur les modalités possibles d'un développement qui soit durable s'appuie sur des concepts économiques et scientifiques qui illustrent le contexte dans lequel elle est menée.



De nouveaux objectifs pour le développement durable (d'après R. Camagni). **1**

Questions	Conceptions			
	A	B	C	D
Que faut-il soutenir ?	Le capital (humain + naturel) ayant une fonction économique	Le capital naturel "critique" (les fonctions écologiques vitales pour l'Homme)	Le capital naturel "irréversible" et vulnérable	L'ensemble du patrimoine naturel "signifiant"
Pourquoi ?	Accroître le bien-être matériel	Accroître le bien-être matériel et non matériel	Accroître le bien-être et respecter nos "obligations" par rapport à la nature	Respecter nos "obligations" par rapport à la nature
Quelles préoccupations essentielles ?	1 et 2	1, 2, 3, et 4	(2 et 6) puis (1 et 5)	(5 et 6) puis (1 et 2)
Quel degré de subséquentialité entre capitaux naturels/non naturels ?	Considérable	Pas entre capital produit par l'Homme et capital naturel critique	Pas entre capital produit par l'Homme et capital naturel "irréversible"	Très limité
Quel niveau de "soutenabilité" ?	Faible	Fort	Fort	Extrêmement fort (conservation)

2 Quatre conceptions de la soutenabilité de l'environnement. Avec besoins matériels humains indispensables : génération présente (1), génération futures (2). Avec besoins matériels et non matériels: génération présente (3), génération futures (4). Avec besoins "non humains" : génération présente (5), génération futures (6).

Le mouvement pour un développement durable s'inscrit dans une large évolution des pratiques de l'aménagement urbain et du gouvernement des territoires en général. On peut relever, parmi ces changements : le moindre rôle directeur et volontariste des pouvoirs publics et par conséquent, le poids croissant dans les décisions des enjeux économiques privés, via le "partenariat" ; la perte des modèles de références et le reflux des utopies ; le déclin de la planification face à l'essor de la démarche de projet ; l'importance grandissante de la vie associative dans le débat public ; la multiplication des acteurs et des instances dans le champs urbain, l'émergence de capacités nouvelles d'expertises, le décloisonnement des compétences et la construction de savoir-faire transversaux ; le nombre croissant de contentieux qui émanent de cette multiplication d'acteurs¹.

Ce que les philosophes ont nommé "la fin des grands récits"² se traduit de plusieurs manières dans l'urbanisme et tout d'abord, par la disparition de tout "grand modèle" qui serait *a priori* adéquat pour résoudre les questions urbaines. Dans un contexte d'incertitude, de complexité, de multiplicité et de mouvance des données, seuls des systèmes de pensée flexibles, ouverts, avec un grand nombre de variables et d'indétermination seraient efficaces.

Par ailleurs, outre l'organisation pyramidale du territoire (communes, régions, État, etc.), on assiste à la montée de la puissance économique des entités urbaines, qui fonctionnent de plus en plus en réseau horizontal. Le "gouvernement des villes" est une question qui se détache progressivement de celle de gérer l'État³, ce qui se traduit en France par la mise en œuvre de la "décentralisation", depuis 1982-83 : il s'agit de donner plus de pouvoirs aux échelles "locales", sachant qu'en parallèle, l'État a aussi moins de moyens.

C'est donc un changement radical du rôle du pouvoir public : il n'a plus à imposer et mettre en œuvre des actions allant dans "l'intérêt général", puisque celui-ci n'est plus définissable ; et son rôle d'arbitre, entre des acteurs aux enjeux contradictoires, lui-même disparaît : le pouvoir public devient un acteur parmi d'autres dans les processus de décision. Ainsi, ce qu'on nomme "la gouvernance urbaine", qui doit répondre à cette nouvelle donne, se caractérise par quelques pratiques types, dont : "l'intégration" transversale des politiques, plutôt que l'approche sectorielle ; le "partenariat public/privé", qui permet d'associer aux actions publiques, les fonds et les intérêts privés ; mais surtout la "concertation", qui permet que la décision arrêtée résulte d'une négociation entre tous les acteurs concernés. Le principe est qu'une bonne décision n'existe pas *a priori*, et qu'elle ne peut aller contre l'intérêt d'un acteur. La meilleure décision est donc celle qui est acceptée par tous et pour cela, il faut qu'elle soit une construction collective¹.

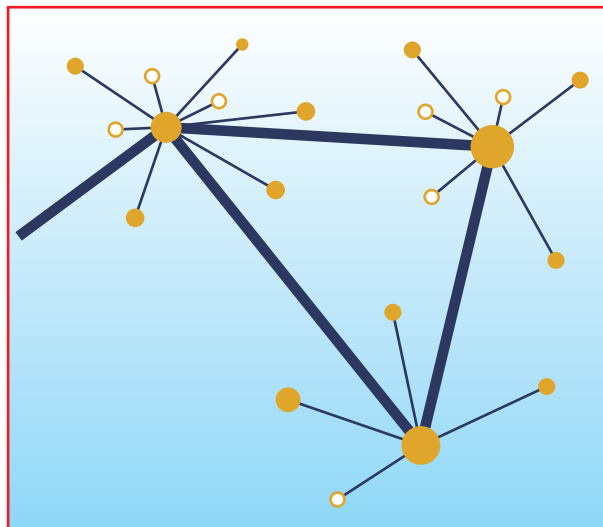
On retrouve bien des parallèles avec le développement durable, défini par Roberto Camagni comme "un processus basé sur l'apprentissage collectif, la capacité de règlements de conflits et la volonté de dessein stratégique et non sur l'application d'un modèle optimal prédéfini" ; et dont l'objectif est "de considérer ensemble les différents systèmes composant la ville (économique, social, physique et environnemental), dans leur co-évolution et leurs interactions dynamiques".

1 Yves Chalas, "L'urbanisme à pensée faible ou l'imaginaire aménageur postmoderne", *L'invention de la ville*, Paris : éd. Economica-Anthropos, 2000.

2 J.-Fr. Lyotard. *La condition postmoderne : rapport sur le savoir*, Paris : éd. de Minuit, 1979.

3 Alain Bourdin, "Le gouvernement des villes institue autant qu'il coordonne ou, les limites des théories de la gouvernance", *La ville éclatée*, La Tour d'Aigues : éd. de l'Aube, 1998.

La gouvernance urbaine demande un changement radical : non plus appliquer des règles dans "l'intérêt général", mais construire des processus de décision où le pouvoir public est un acteur parmi d'autres.



Nouvelle organisation polarisée autour de villes principales, qui se différencie des systèmes radio-concentriques et des maillages réguliers (d'après M. Rochefort et Fr. Ascher).

1

Objectifs	Actions		
	Éviter les évolutions irréversibles vers un développement non durable	Favoriser un développement intégré et équilibré	Favoriser la réactivité par l'innovation institutionnelle et la flexibilité
ARTICULER LES DIMENSIONS DU DÉVELOPPEMENT Intégrer l'environnement dans l'économie	Ne pas dépasser durablement les normes de sécurité minimales	Internaliser les coûts sociaux de l'environnement Découpler pollution et croissance Accroître le contenu en envt. de la croissance Valoriser les potentiels écologiques locaux	Mieux intégrer le temps (long) dans l'action Développer les outils d'intégration et d'évaluation Décloisonner les structures institutionnelles et faciliter les partenariats
Intégrer l'économie dans l'environnement	Respecter un seuil d'endettement, de pression fiscale et de surcoût	Choisir les incitations et les actions les plus efficaces Développer les emplois écologiques et "l'écologie industrielle"	Démocratiser les procédures et les décisions, donner du temps à la concertation, conforter les associations Favoriser la contre-expertise (commission régionale d'évaluation)
Intégrer le social dans l'environnement et prendre en compte les besoins fondamentaux	Assurer un minimum d'accès aux besoins et aux services publics fondamentaux pour les catégories défavorisées Ne pas accroître les inégalités écologiques	Réduire les inégalités écologiques Donner plus d'importance à la dimension sociale des politiques d'environnement (santé, accès à la nature, bruit...)	Créer des "observatoires" et des lieux de débat Créer des systèmes d'alerte et de gestion des crises
Intégrer les trois dimensions : sociales, économique, environnementale	Éviter les triples impasses Hiérarchiser les risques et orienter prioritairement l'action publique vers la prévention des situations non durables	Mener des politiques de "qualité globale" Augmenter le contenu en emploi et en environnement de la croissance, développer les services Favoriser l'insertion (économie solidaire) Donner la priorité aux zones de reconversion Favoriser l'innovation dans une optique "win-win"	
PRENDRE EN COMPTE LES GÉNÉRATIONS FUTURES ET ARTICULER LES ÉCHELLES DE TEMPS	Ne pas détruire de manière irréversible "les capitaux critiques" (importants, rares, non substituables) Protéger les infrastructures vitales	Accroître et diversifier les patrimoines et les capitaux Gérer, entretenir, réhabiliter les capitaux et patrimoines existants Privilégier les politiques "sans regret" Appliquer le principe de précaution Soutenir l'innovation sociale	Élaborer et discuter des scénarii à long terme Généraliser les Agendas 21 Construire des indicateurs de développement durable Créer des fonds de réserve Réduire les vulnérabilités Démocratiser l'information
ARTICULER LES ÉCHELLES SPATIALES	Ne pas contribuer massivement à l'augmentation des pollutions globales Respecter les engagements de Rio (effet de serre) Limiter le "dumping écologique" et l'exportation des risques vers les pays du Sud	Favoriser un développement endogène équilibré à l'échelle régionale Articuler valorisation des territoires et valorisation des produits (politique de "qualité totale") Limiter l'externalisation des risques sur les territoires voisins (principe de proximité)	Créer ou favoriser les institutions à la bonne échelle (pays, agglomérations, bassins...), décentraliser Développer les partenariats ville/campagne, régions, Europe Coopération décentralisée Nord/Sud Solidarités fiscales Schémas d'aménagement emboîtés (à l'allemande)
DONNER LE PRIORITÉ À L'ENVIRONNEMENT ET À L'ÉCONOMIE DE RESSOURCES	Éviter les risques et catastrophes majeurs Respecter les normes internationales et européennes	Économiser les ressources : ne pas prélever plus de R. Ren. que l'accroissement des stocks, substituer RN aux RNR, respecter les capacités de charges et d'assimilation au milieu Développer les infrastructures écologiques	Former, éduquer à l'environnement (universités, écoles) Évaluer l'impact des plans et programmes Développer des tableaux de bord (performances) et la veille juridique Créer des structures de gestion patrimoniale

2 Les différentes formes d'action publique à équilibrer, en faveur du développement durable (d'après J. Theys).

Le projet urbain est souvent défini avant tout comme une œuvre "ouverte" : "il diffère du projet architectural car il ne répond pas à une question mais à une diversité de questions. Il ne peut donc être ni univoque, ni fini¹." Après la planification moderne qui concevait la ville en une fois, par zonages et fonctions, et à la suite des travaux de l'école italienne² sur la morphologie des villes, une "redéfinition des rapports entre les édifices et la ville, entre l'architecture débarrassée de ses obsessions formalistes et l'urbanisme délivré de ses pesanteurs technocratiques, est revendiquée en France (...). Elle suppose une nouvelle formulation du rôle des techniciens de l'aménagement et de leurs rapports avec les habitants et les collectivités locales ; et elle appelle de nouveaux outils conceptuels du projet³".

Il s'agit en général de prendre en compte dans la conception des lieux, une pluralité d'acteurs, d'échelles et de temporalités. Celle-ci doit intégrer certes un phasage des opérations, mais surtout des rythmes différents : aménagement, foncier, immobilier, promotion, construction, appropriations potentielles, n'ont pas lieu aux mêmes échelles, ni spatiales, ni temporelles. C'est sur la distinction essentielle entre espace public (dont la collectivité est responsable) et des espaces privés (où des modifications indépendantes ne perturbent pas l'ensemble), que se basent avant tout les outils manipulés : tracé et profil des voies, découpage du sol, parcellisation, localisation des activités, implantation du bâti ; l'intégration la plus transversale possible de ces tâches, comme de toutes les techniques (réseaux, infrastructures) vise à un aménagement urbain plus rationnel, car interdisciplinaire.

Mais il désigne aussi, de plus en plus, un projet défini "par la communauté", parfois via la consultation des habitants, s'inscrivant dans un processus de politique publique attachée à promouvoir les lieux, et qui tient plus de l'incitation que de la réalisation directe. Cela est bien à l'image des objectifs que le développement durable fixe aux échelles locales. En outre, le processus même de "projet" (urbain ou autre) prend une place de plus en plus importante, "entre théorie et pratique", procédant de méthodes expérimentales et par itérations. Celles-ci "tendent à situer progressivement les professionnels en amont de la décision politique comme conseil et non plus uniquement en exécutants (...) et placent le critique et l'intellectuel au sein de la production urbaine, moins comme phares que comme navigateurs⁴". On retrouve les procédures de décision que le développement durable défend, telles que l'intégration, l'évaluation permanente, le feed-back.

On observe aussi un changement du "temps à l'envers" vers le temps "à l'endroit⁵" : au lieu que la définition des différentes phases en amont ne découle de l'objectif final, dans cette logique, chaque sous-ensemble d'une opération est configuré en tant que tel, compte tenu de l'état des forces et de la conjoncture donnée (marché immobilier, taux d'intérêts, négociations, etc.) ; et quand il est réalisé, le suivant dépend d'un nouveau "jeu de forces instantanées". Ce sont donc souvent les données du court terme qui pèsent le plus, contrairement aux objectifs portés par le développement durable.

1 Bernard Huet, "Re-constructions", *Projet urbain* n° 16, avril 1999.

2 Saverio Muratori, *Studi per una operante storia urbana di Venezia*, Roma : IPS, 1959 ; mais aussi : Carlo Aymonino, Giorgio Grassi, Vittorio Gregotti, Aldo Rossi, etc.

3 Philippe Panerai, David Mangin, *Projet urbain*, Marseille : éd. Parenthèses, 1999.

4 Alain Charre, "L'intellectuel, la mégapole et le projet urbain", *Les nouvelles conditions du projet urbain. Critique et méthodes*, Liège : Mardaga, 2001.

5 Yves Janvier, "Crise de l'aménagement et transformations des temporalités de l'action publique", *La ville éclatée*, N. May et al., La Tour d'Aigues : éd. de l'Aube, 1998, p. 307.

Le projet urbain se caractérise par la prise en compte dans la conception des lieux, d'une pluralité d'acteurs, d'échelles et de temporalités. Mais il désigne aussi un projet "défini par la Communauté".



Projets urbains **1**
 (source : www.euromediterranee.fr).

Projet

L'historique
 Le site de Marseille-métropole
 Les partenaires publics
 Le maître d'ouvrage



Stratégies

Développement économique
 Aménagement urbain
 Rayonnement culturel
 Dynamisation des quartiers



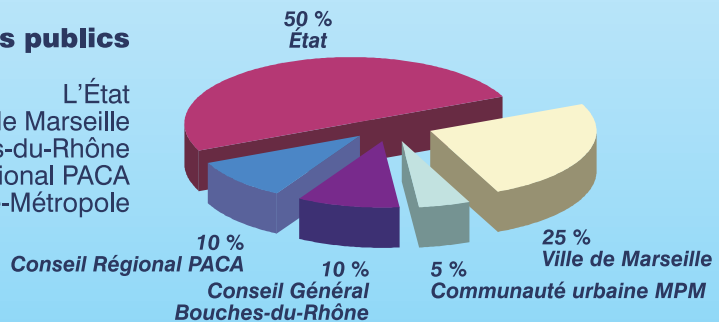
Opérations

Joliette-Arenc
 Saint-Charles
 Belle de Mai
 Quartiers existants
 République
 Cité de la Méditerranée



Les partenaires publics

L'État
 La Ville de Marseille
 Le Conseil Général des Bouches-du-Rhône
 Le Conseil Régional PACA
 La Communauté urbaine Marseille-Provence-Métropole



2 "Euroméditerranée" à Marseille (source : www.euromediterranee.fr).

Le "renouvellement urbain" fait partie des politiques récentes visant à reconstruire la ville sur la ville qui s'inscrivent dans une problématique phare du développement durable urbain : l'étalement. Ce que la mobilité croissante a permis est globalement néfaste à l'environnement, à cause des rejets produits par les moyens de transports mais aussi en terme de déperditions de chauffage, du coût des services (éclairage public, ramassage des déchets, réseaux de flux), de disparition de surfaces de territoire rural et de consommation de surfaces artificielles (modification des nappes phréatiques).

La Commission européenne, depuis la publication de son livre vert sur l'environnement urbain (1990), prône "la ville compacte", concept qui repose sur : la densification du bâti, en comblant les espaces interstitiels et en réutilisant les friches urbaines, et la limitation de l'éparpillement résidentiel, par la maîtrise foncière des terrains, le contrôle de l'usage des sols ; mais aussi la densification des réseaux de transport en commun et le renforcement de l'urbanisation autour des points de forte accessibilité, pour localiser les activités économiques et l'habitat à proximité des voies de communication et des réseaux de transport en commun¹.

Enfin, elle défend la mixité fonctionnelle et sociale dans les usages du sol, pour réduire les besoins de déplacements et la ségrégation sociale ; et la reconquête des espaces publics, dont les espaces verts. En effet, un des leviers principaux agissant pour la densité urbaine serait de retrouver l'envie d'habiter en ville, ce qui est bien la difficulté majeure, dans le cadre actuel des aspirations de la majorité des habitants, qui vont vers le "pavillon" isolé.

Le débat est important car de nombreux urbanistes ne croient pas que le retour à des villes denses, de taille moyenne et entourées de campagne soit réaliste. Par contre, un consensus apparaît autour de formes de "décentralisation concentrée", des modèles de polycentrisme avec renforcement de l'effet urbain, incluant de vastes zones vertes dans les aires métropolitaines : *green belts* anglais, *Randstad* aux Pays-Bas, ou les structures en "doigts de gants" le longs de grands axes urbains scandinaves.

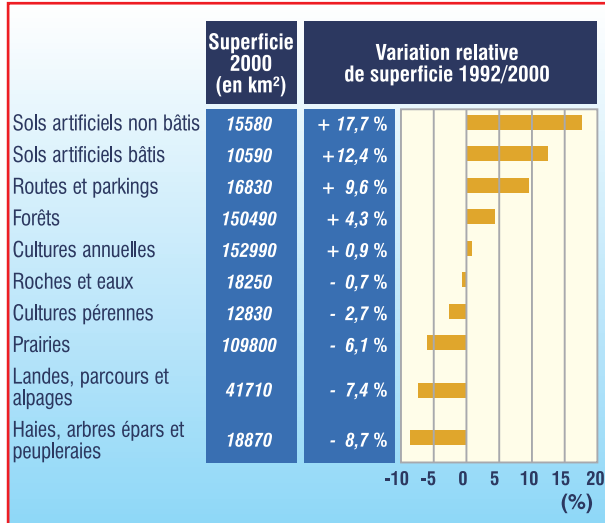
En France, la loi Solidarité et renouvellement urbain (SRU, 2000) instaure ces préoccupations dans un renouveau des procédures : les Plans locaux d'urbanisme (PLU), qui remplacent les Plans d'occupation des sols (POS) sont des documents stratégiques et opérationnels - qui privilégient la prise en compte globale des enjeux et qui s'orientent vers le projet urbain - par rapport à une vision uniquement réglementaire. Ils visent aussi à une meilleure lisibilité par les citoyens, afin de faciliter la concertation à laquelle ils doivent être soumis.

En outre, la loi impose d'associer aux PLU un "Projet d'aménagement et de développement durable" (PADD), cadre de cohérence pour toutes les actions d'aménagement engagées par la commune. Ces plans doivent prévoir l'équilibre entre le renouvellement urbain, un développement urbain maîtrisé et celui de l'espace rural, et d'autre part, la préservation des espaces d'activités agricoles et forestières, la protection des paysages et des espaces naturels. Ils doivent également organiser la diversité des fonctions urbaines, la mixité sociale, les besoins en déplacements, etc., dans le but de préserver la qualité de l'air, de l'eau, du sol, du sous-sol, des écosystèmes².

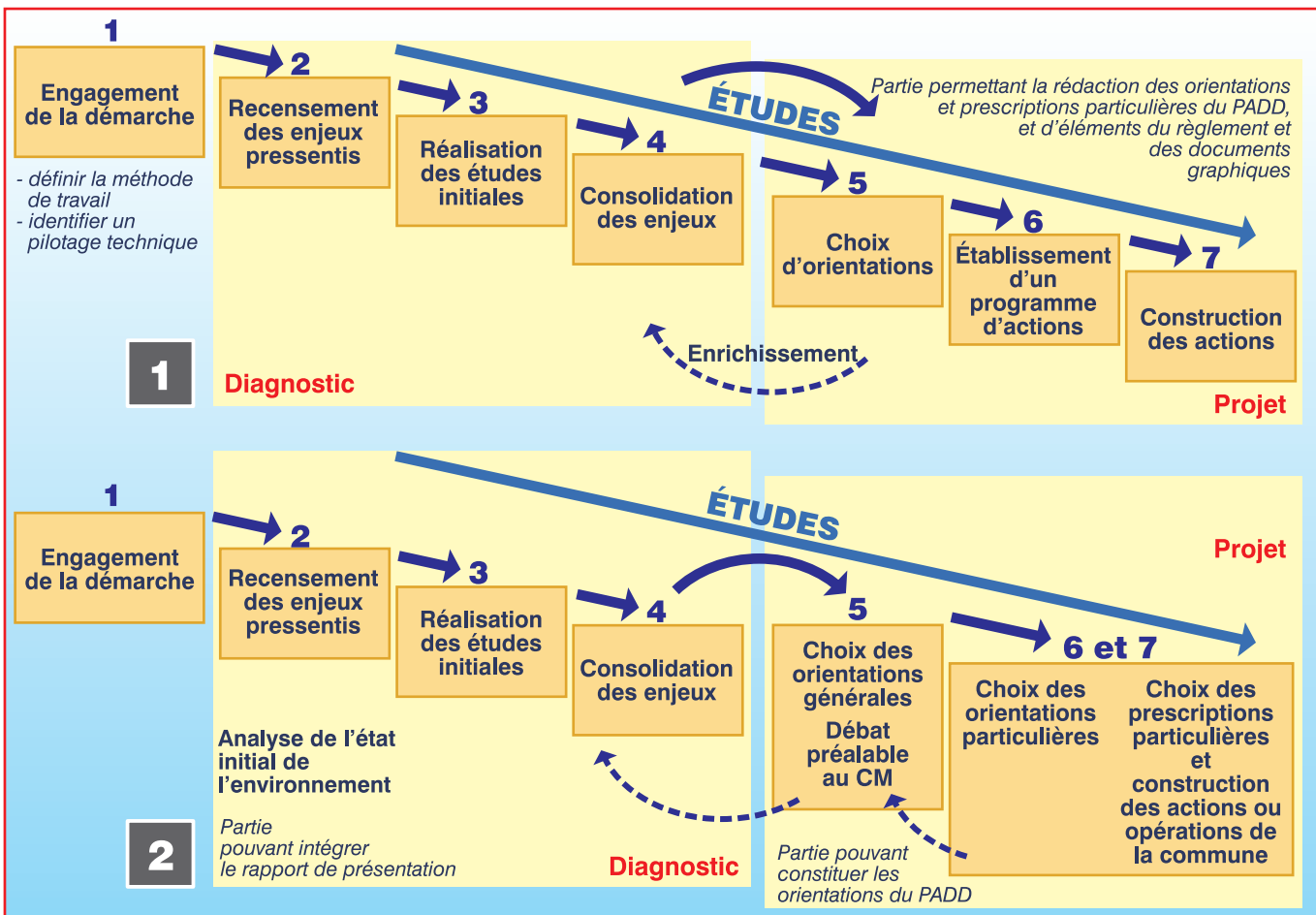
1 Cf. dossier documentaire de 20 fiches réalisées pour le Sommet de Johannesburg 2002 par le ministère de l'Écologie et du Développement durable.

2 CERTU, *Le projet d'aménagement et de développement durable du PLU*, référence n° 24, DGUHC - ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, avril 2002.

Le "renouvellement urbain" est une politique récente qui vise à reconstruire "la ville sur la ville" et qui s'inscrit dans un mouvement européen pour "la ville compacte". En France, les lois SRU renouvellent les procédures dans un sens plus stratégique et moins réglementaire.



1 "L'artificialisation" des sols en France métropolitaine (source : www.ifen.fr/chifcle/territoire.pdf).



2 Le renouvellement urbain s'inscrit dans de nouvelles démarches de projet (source : ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement). 1. Une démarche de projet structurée. 2. Une démarche adaptée au Plan Local d'Urbanisme (PLU).

Les logiques d'entreprises sont aujourd'hui un des facteurs importants que l'on prend en compte dans l'organisation des villes. L'économie évolue de manière générale vers le secteur tertiaire (commerce, gestion et production de services) : celui-ci est moins dépendant d'infrastructures de production lourde, par contre il devient très dépendant de "l'image" de son implantation. C'est pourquoi il a la possibilité et la tendance à se dé-localiser facilement. Une agglomération qui veut recevoir le "tertiaire supérieur" doit fournir un site de qualité : espaces publics, accompagnement universitaire et de recherche, accompagnement en résidentiel, équipements et commerces. Pour d'autres activités, soumises aux contraintes de stockage par exemple, c'est le foncier à bas prix qui sera prioritaire et l'accessibilité : elles s'implantent en périphérie, recherchent les points d'échanges routiers contribuant à la consommation foncière et à augmenter les déplacements, tout comme la flexibilité de l'emploi engendre les longs parcours quotidiens.

Aussi, les évolutions touchant les activités économiques influencent-elles la forme du milieu urbain. Actuellement, on constate une externalisation croissante des fonctions accessoires, et donc la part grandissante de la sous-traitance et de petites et moyennes entreprises, mouvantes et investissant peu dans l'immobilier. Mais ce faisant, l'interdépendance des entreprises se renforce et favorise les lieux où l'offre de services disponibles est importante.

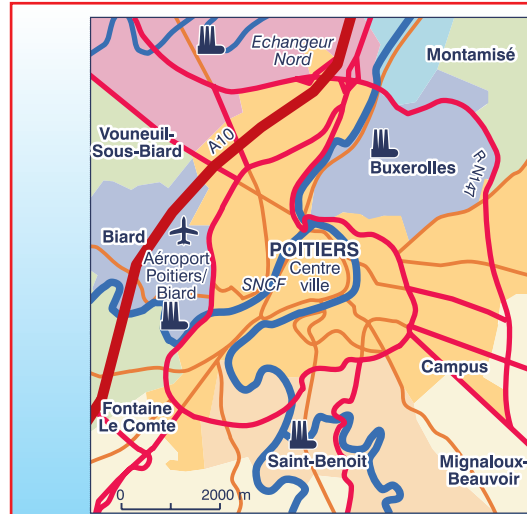
Les villes ont intérêt à attirer les entreprises, dans le cadre de la décentralisation ou, plus généralement, de la polarisation des territoires en "nœuds" urbains, formant réseau par-delà les anciennes frontières. Mises sur pied d'égalité et donc en compétition, des responsabilités nouvelles incombent aux villes et de plus en plus de moyens leur sont nécessaires. Or, les entreprises contribuent au taux d'emploi dans la région, donc à son dynamisme et à ses finances, via la taxe professionnelle.

C'est pourquoi un réel "marketing" se développe au sein des collectivités urbaines afin de promouvoir leur territoire, et le "projet urbain" en fait partie, ou même désigne parfois la totalité de la stratégie locale. Les procédures financières en "partenariat public-privé" expriment bien leur double sens, l'idée que "tout le monde" y gagne : la ville profite de la contribution de l'entreprise au développement urbain (qui viabilise par exemple les terrains), tandis que l'entreprise oriente les décisions concernant son environnement (par exemple, les fonctions à implanter dans son secteur).

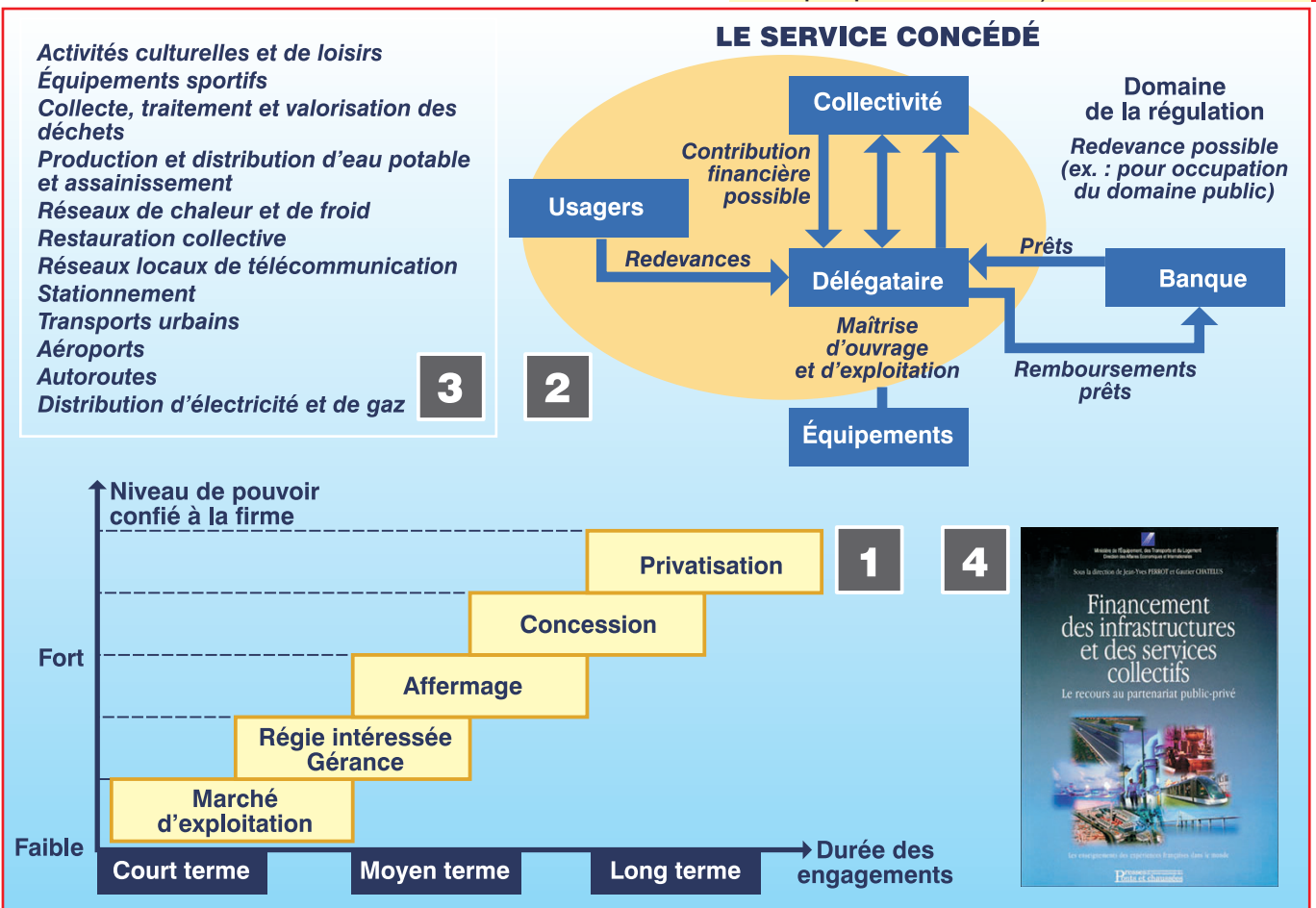
Cependant, des processus d'engrenage peuvent aussi se créer, car ce sont les communes les plus attractives au départ qui obtiennent le plus de financement, tandis que pour les délaissées, renverser un tel mécanisme est souvent insurmontable. Et dans ces cas-là, les procédures d'intercommunalités (qui mettraient en commun les revenus et déciderait ensemble des applications prioritaires) sont encore rares. Cela met en évidence la question de l'échelle à laquelle gérer le développement du territoire pour qu'il soit équitable et solidaire. Se pose aussi celle des moyens dont l'action publique peut disposer : si le partenariat et la concertation prônés par le développement durable permettent d'intéresser de nouveaux acteurs aux décisions urbaines (en termes financiers, de responsabilisation et de définition d'objectifs), il est souvent remarqué¹ que les pouvoirs publics pourraient agir davantage sur la localisation des entreprises - et donc sur l'insertion territoriale de l'emploi et la mobilité - au moyen d'aides ou de défiscalisation spécifique, et ce, dans un schéma pensé plus globalement.

¹ Marc Sauvez, *La ville et l'enjeu du "développement durable"*, rapport au ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, La Documentation française, 2001, p. 155.

Les évolutions actuelles touchant les activités économiques influencent la forme du milieu urbain : leur localisation est un enjeu important pour les villes.



Rôle de la localisation des infrastructures et des équipements dans le développement de Poitiers (source : www.univ-poitiers.fr, rubrique plans d'accès).



2 Les procédures de partenariat public-privé. 1. Les formes de délégation du service public. 2. La distribution des rôles. 3. Les domaines actuels du partenariat. 4. Publication du ministère de l'Équipement.

Pour J. Donzelot¹, l'existence d'une population incorporée à la ville mais privée de rôle économique pose la question de sa protection sociale, car celle-ci est traditionnellement liée à la condition de producteur. Puisque pour certains, le seul lien avec la société est devenu l'urbain, ce n'est qu'à ce titre "d'habitants" qu'ils peuvent formuler une demande sociale : d'où le déploiement, depuis une dizaine d'années, du "développement social urbain".

En Europe, ces interventions sociales se basent sur la discrimination positive (territoriale) plus que sur l'incitation à la contractualisation (individuelle) : il s'agit de soutenir les zones urbaines défavorisées, par l'octroi de subventions, aides ou exemptions, dans l'idée de compenser des inégalités issues d'une évolution néfaste de la société (décomposition de la condition salariale, des modes de production, impuissance des élites) et de réinsérer les populations "exclues" dans le système collectif. Aux États-Unis, une autre idéologie rejette cela, qu'elle considère comme une forme d'assistanat, et ne prône que le retour sur le marché de l'emploi comme objectif, assignant à chacun le but d'atteindre "l'autosuffisance".

Dans les deux cas, l'évolution générale des modes de gestion territoriales va vers la délégation de ces questions à l'échelle locale (pour s'inscrire dans la nouvelle donne économique urbaine et mieux "adapter les moyens aux attentes exprimées par les habitants"² et ce, dans le cadre du principe de subsidiarité : ne doit être géré à l'échelle globale que ce qui ne peut l'être efficacement à l'échelle locale. Deux attitudes du pouvoir "central" coexistent alors : s'effacer progressivement ou prendre le rôle d'injecter des préoccupations d'intérêt général là où on tendrait à les négliger.

Ces questions sont aussi au cœur des structures décisionnelles participatives, portées par le souhait de politique locale mais aussi par le développement durable. L'enjeu est "d'ouvrir ces structures à la population et aux partenaires institutionnels et privés" ; et de "conforter la représentation politique directe des populations les plus démunies dans les processus de décision locales, partout dans le monde"². Cela mène à la constatation que le processus démocratique de représentation des citoyens ne suffit plus, qu'il y a des "facettes" des individus à représenter particulièrement : les habitants de tel quartier, les usagers de telle ligne, les parents de telle école, et les regroupements tels que associations caritatives ou mouvements "alternatifs".

Or, les objectifs explicités sont doubles³ : d'une part on recherche bien entendu une efficacité "substantive" (la participation, pour conduire à de meilleures décisions, grâce à un apport supplémentaire et plus précis de connaissances et une meilleure compréhension des problèmes) et de l'autre, on vise à une efficacité instrumentale (la participation facilite de manière générale l'acceptation de la décision, elle prévient les réactions de rejet et les actions en justice entamées par des citoyens qui s'estimeraient lésés).

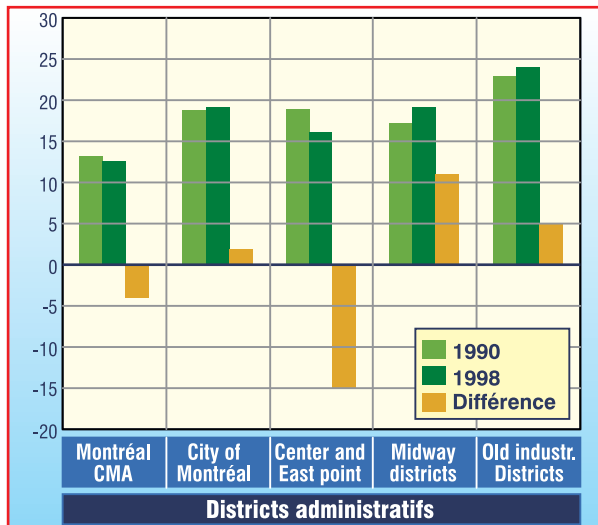
La participation prend donc un grand nombre de formes, en fonction des acteurs concernés, de leur niveau d'implication et de leur pouvoir d'action sur la décision : le premier niveau est de recevoir l'information, un deuxième est l'invitation à s'exprimer (facultative) ; puis la consultation organisée ; enfin la délibération, où on a une discussion avec les autres parties prenantes ; et finalement, la concertation, où on prend part à la décision finale.

1 Jacques Donzelot, "Les zones urbaines défavorisées", *La ville éclatée*, op.cit, p. 254.

2 Mobilisation des acteurs : cf. dossier documentaire de 20 fiches réalisées pour le Sommet de Johannesburg 2002 par le ministère de l'Écologie et du Développement durable.

3 "Mesurer le développement durable en Belgique : quels rôles pour les processus participatifs ?", sur le site du Conseil fédéral du développement durable, <http://www.frdo-cfdd.be/fr/pubfr/pubfr.htm>, rubrique publications.

Le développement social urbain est une forme de protection sociale basée sur l'appartenance à un territoire. Parallèlement, les collectivités développent des structures participatives afin d'intégrer toutes les populations aux décisions.



Mesure de la "dépendance sociale" à Montréal en pourcentage de la population (source : ministère de la Solidarité sociale du Québec).

1

Méthode	Acteurs	Objet	Observation
Enquête publique et commentaires publics	Volontaires, pas de débats	Recueillir les avis	Faible réciprocité Utilisation des avis Représentativité
Focus groups	Participants volontaires Quelques heures	Recueillir les avis	Sujets et problèmes particuliers Représentativité
Focus groups	Représentants des parties prenantes (acteurs déjà informés)	Exprimer les seuils d'inacceptabilité	
Conseil consultatif	Parties prenantes	Donner un avis consultatif sur les évolutions et les orientations stratégiques	Représentativité limitée aux groupes d'intérêt
Panel de citoyens	Petits groupes sélectionnés pour représenter le grand public	Contribuer aux processus de décision Imaginer des futuribles	Délibératif Recherche de l'expression des valeurs Représentatifs
Jury de citoyens ou conférence de consensus ou noyau d'intervention participative (planning cell)	Idem que panel (type jury d'assises) + témoins représentant les intérêts concernés + experts + modérateur Éventuellement répétés	Rendre un jugement et une recommandation de planification plus formels (vote)	Délibératif Recherche de l'expression des valeurs Représentatif mais faible échantillon
Sondage délibératif	Jury de citoyens + échantillon beaucoup plus large + sondage par questionnaire (avant et après délibération)	Montre ce que penserait la population si elle avait l'occasion de développer des préférences réflexives	Délibératif Recherche de l'expression des valeurs Vote représentatif
Télévote	Sondage délibératif mais sans délibération organisée et sans interaction directe Sondage par téléphone (ou par internet)	Les participants sont d'abord sondés puis reçoivent du matériel informatif. Ils sont invités à en discuter entre eux et avec leur entourage puis nouveau sondage	Permet un échantillon très important Moins cher que SD

2 Les principaux mécanismes de la "participation" (source : Institut pour un développement durable - Belgique).

L'aménagement urbain et du territoire s'occupent non seulement de planifier en "statique" l'occupation des sols, la localisation des activités, mais aussi de gérer la dynamique des flux qui les irriguent et qu'elles produisent. Les réseaux techniques sont les conditions de base du développement socioéconomique d'une collectivité urbaine ; ils sont donc de responsabilité publique car ils satisfont des besoins essentiels¹ : disposer d'eau pour différents usages : disposer d'électricité et de chaleur (ou de climatisation) avec du gaz, fuel, chauffage urbain ou électrique ou des énergies renouvelables ; collecter et traiter les déchets ménagers et industriels ; se déplacer et transporter des biens ou des marchandises ; échanger des informations et plus généralement tout ce qui relève de la communication.

Les problématiques environnementales y sont primordiales puisqu'il s'agit du traitement des déchets, industriels et ménagers ; des rejets et de la pollution des nappes et des rivières ; des choix dans les modes de production d'énergie ; et d'enjeux plus larges du développement durable : l'égalité des chances devant les moyens de communication et l'accessibilité de l'information ; les échelles de gestion locale ou globale ; ou encore les questions soulevées par les réseaux de déplacement, la consommation de territoire, l'investissement dans les infrastructures, etc.

Les réseaux techniques de gestion des flux acquièrent une échelle et une complexité croissante tandis que les interactions entre eux et par là, le souci de les coordonner est de plus en plus capital, en même temps que le nombre et le type de réseaux augmente et se diversifie. Des outils d'information, de gestion et de prévision de plus en plus sophistiqués deviennent nécessaires ; mais en parallèle, aucun outil ne représente à lui seul une vision panoptique du territoire, comme Latour le décrit dans son exploration de ce qui mesure Paris : "l'eau, l'électricité, le téléphone, la circulation, la météorologie, la géographie, chacun possède son "oligoptique" : un grand tableau central au milieu d'un bureau fermé où l'on voit sur Paris avec une grande précision, très peu de choses à la fois grâce à un double réseau de signes qui vont et viennent (...). Aucune salle de commande, aucun tableau synoptique ne rassemble en un seul lieu tous ces fluides à la fois²."

La question de l'échelle de gestion des réseaux et de sa concordance avec les périmètres territoriaux est importante, car les découpages institutionnels de l'échelle communale sont en conflit avec le fonctionnement économique efficace des services publics en réseaux. En outre, des liens pervers peuvent s'établir entre planification territoriale et de réseaux : les modèles de prévision des investissements routiers par exemple justifient la création d'une nouvelle infrastructure par la présence d'habitants, alors que ceux-ci s'y sont implantés pour d'autres raisons, tandis qu'elle va créer par contre un appel pour d'autres habitants, et contribuer à l'étalement urbain³.

Dans le territoire de la Randstad (Pays-Bas), un lien est tenté entre plan d'occupation des sols et réseaux, à travers la définition de trois types de zones (ABC) où forme de mobilité et type d'activités sont liés : des zones de grandes chalandises sont associées aux transports publics tandis que celles de stockage sont associées à la route ; c'est un réel choix de société car la rigidité des zones s'oppose souvent aux stratégies des acteurs économiques.

1 Conseil économique et social (France), "La maîtrise des services publics urbains organisés en réseaux", rapport annuel 2001, <http://www.conseil-economique-et-social.fr/>

2 Bruno Latour, Émilie Hermant, *Paris ville invisible*, éd. La Découverte, 1998, p. 58.

3 Marc Sauvez, *La ville et l'enjeu du "développement durable"*, rapport officiel au ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, La Documentation française, 2001, p. 260.

Les réseaux techniques de gestion des flux acquièrent une complexité croissante : leur nombre augmente et ils se diversifient, tandis que les interactions entre eux et le souci de les coordonner est de plus en plus capital.



Contrôle des flux dans la ville au Service interdépartemental d'exploitation (SIER) d'Île-de-France (source : ministère de l'Équipement).

1

		Localisation type		
		A Transports publics	B Transports publics et voiture	C Automobile principalement
Caractéristiques	Transport public	Accessibilité longue distance, proximité de nœuds de correspondance du réseau urbain des transports publics et du réseau ferré intercités	À proximité des nœuds de raccordement des réseaux de transports publics de niveau urbain ou régional	Pas de conditions particulières formulées. Une plus grande diffusion des formes alternatives de transport collectif (company buses, car-pooling) est souhaitée
	Transport motorisés	L'accessibilité du trafic automobile est secondaire. Le stationnement est réglementé pour réduire l'utilisation de la voiture de la part des navetteurs ; ce qui suppose des correspondances entre réseau de transport public et des raccordements dans les zones urbaines de la couronne	Un axe principal à proximité d'une route ou d'un échangeur autoroutier, offre des places de stationnement de longue durée relativement réduite ; stationnement réservé particulièrement aux usagers dont les activités dépendent peu du transport motorisé	À proximité immédiate d'un échangeur important d'autoroutes, et des axes de déplacement importants Le stationnement s'oriente vers des activités à nombre d'employés peu élevé ; vers les compagnies et les sociétés pour le transport des marchandises ou à forte dépendance routière
	Organisation des espaces ouverts	Particulièrement accessibles aux piétons et aux cycles. Liaisons fréquentes vers d'autres nœuds de réseau de transport national et européen. Commerces et équipements orientés vers les services favorisent l'emploi et la résidence	Usage des moyens de transports publics et de la bicyclette encouragé par l'organisation des espaces. Accès aux transports publics et accessibilité modérée des voitures. L'objectif fixé est de diminuer les déplacements pendulaires automobiles de 35 %	Puisque localisé aux franges périurbaines, le nombre de stationnement est limité pour ne pas rendre ces zones trop attractives et drainer une circulation motorisée injustifiée
	Activités à implanter	Activités avec affluence des usagers ; fonctions avec un nombre important d'employés par surface et/ou un nombre important de visiteurs clients dont la demande de transport de marchandises est faible	Intensité modérée d'employés et de visiteurs-clients, de la demande de transport routier des marchandises	Fonctions dont le nombre d'employés et de visiteurs clients est faible et dont la demande en transport routier est élevée

2 Le système de zones "ABC" de la Randstad (Pays-Bas).

Traditionnellement, les territoires sont appréhendés par une représentation géographique en cartes et plans d'une part, et par une approche comptable en bases de données alphanumériques, d'autre part. Les SIG (Systèmes d'information géographique) apportent une vision globale de ces territoires en permettant, par la mise en œuvre d'outils qui associent chiffres et cartes, de lier les deux domaines, de les enrichir mutuellement ou de les synthétiser. Mais ils permettent aussi de regrouper et relier des informations auparavant hétérogènes et dispersées : si les supports cartographiques proviennent essentiellement des services techniques de la collectivité ou de l'État, les données à leur associer sont souvent produites par les services administratifs (rapports d'activités, comptabilités, etc.)¹.

Le Système d'information géographique est ainsi un outil de gestion alimenté et interrogé par toute instance de la collectivité. Aux nombreuses données recueillies dans les collectivités locales, ils ajoutent l'intérêt de la localisation des informations dans l'espace et la mise en évidence d'évolution dans le temps. Par exemple : la localisation des divers types d'habitats, des différentes cibles de l'action sociale, de la résidence des personnes âgées ; la répartition des modes de garde des enfants, de l'extension de la couverture des actions de vaccination ; la fréquentation des équipements publics, etc.

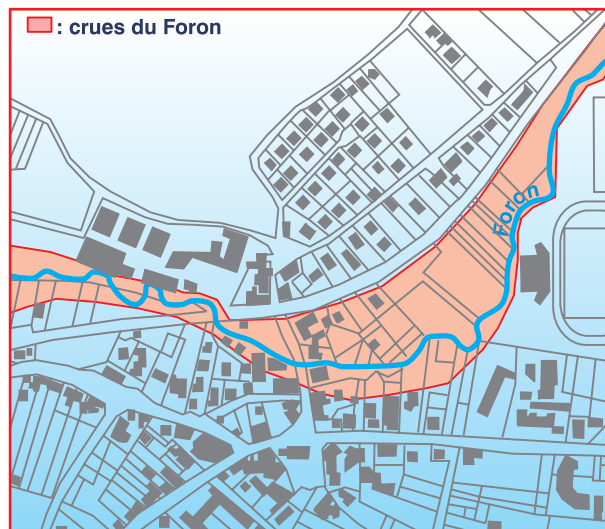
L'évolution principale, dans les processus, est donc le passage de la circulation des représentations - la carte toute faite - à la mise en commun et à la circulation des informations à partir desquelles seront faites les cartes. Le rôle des acteurs change également, par une implication croissante : les gestionnaires ne sont plus de simples consommateurs de cartes thématiques que leurs fournisseurs des spécialistes. Avec les SIG, ils manipulent et traitent l'information localisée tout comme leurs données numériques. Par ailleurs, à l'image de la gouvernance et de la concertation, ce sont aussi des outils qui se construisent au fur et à mesure des besoins et non des modèles tout fait à appliquer. Ils sont adaptables, mis à jour et pilotés "en temps réel", ils impliquent une responsabilisation et un dialogue accru entre acteurs.

La diversité des sources est une des principales difficultés dans la construction d'un SIG. Il peut apparaître qu'un plan numérisé à partir des fonds cadastraux raccordés entre eux ne soit pas cohérent avec le fonds IGN (Institut géographique national) ou avec la couche des limites administratives, ou avec l'orthophoto (photo aérienne dont on a corrigé les déformations dues à la variation de distance entre les points représentés et l'objectif). La conséquence graphique est qu'un carrefour restitué sur cette base photogrammétrique se raccordera mal à une route qui n'est répertoriée que par son axe et son tracé. Enfin, la croissance des sources d'information en nombre et en diversité ne rend pas aisée l'interprétation des représentations trop hétérogènes qu'elle génère. L'écart peut se creuser entre la perception de terrain et les orientations stratégiques², c'est le risque que "trop d'information tue l'information".

Lyon est l'exemple d'une ville qui a très tôt décidé de mettre en œuvre une gestion globale et mise à jour de son évolution. Le coût d'un système efficace dépassant les capacités financières d'une commune isolée, sa réalisation est passée par le groupement des communes : la communauté urbaine de Lyon en regroupe 55, dont les besoins ne sont pas identiques. C'est un système "personnalisé" qui a été élaboré, permettant à chacune de puiser dans le fonds commun et de développer ses propres applications.

1 Cf. les fiches techniques sur le site de l'Association française pour l'information géographique : <http://www.afigeo.asso.fr/frame.php?label=documentation>
2 <http://www.cnig.serveur-1.net/fiches/04CHOTEC.html>

Les SIG associent les données alphanumériques et la cartographie : le processus de communication évoluée, de cartes toutes faites, à la mise en commun des informations à partir desquelles les cartes seront faites.



Cartographie des crues du Foron (Haute-Savoie, France, Suisse).

1

Cadastre	Voies et adresses (application Ariane)	Plantation d'alignement (application Dryade)	Carte des accidents
<p>Objectifs : avoir un fond de plan unique, couvrant l'ensemble du Grand Lyon.</p> <p>Informations contenues dans l'application : commune, sections, subdivisions fiscales, bâtiments, documents d'arpentages, éléments d'habillage (détails topographiques).</p> <p>Volume de l'information : 1 550 sections cadastrales, 201 000 parcelles, 260 000 bâtiments</p>	<p>Objectifs : visualiser la trame viaire sous forme schématique, afficher les toponymes, localiser les adresses postales...</p> <p>Informations contenues dans l'application : schématique des voies et carrefours, noms des voies, numéros de voirie, sens de circulation.</p> <p>Volume de l'information : 142 000 adresses, 2 500 lieux-dits, 4 300 km de voirie</p>	<p>Objectifs : connaître et aider à la gestion du patrimoine végétal, définir les priorités d'intervention, planifier les investissements</p> <p>Informations contenues dans l'application : localisation sur le domaine public des arbres d'alignement, 22 informations par arbre (essence, état de santé...)</p> <p>Volume de l'information : 55 000 arbres d'alignement</p>	<p>Objectifs : améliorer la sécurité routière par vision globale, localisation et aide à l'analyse...</p> <p>Informations contenues dans l'application : cartes des accidents par fréquence, gravité, types, accumulations (points noirs), taux par voie, liste des accidents sélectionnés géographiquement</p> <p>Volume de l'information : 2 500 à 3 000 accidents par an</p>

2 Les premières applications d'une mise en commun des données dans la communauté urbaine de Lyon.

Sous la coordination du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), le projet de recherche et de démonstration dénommé "HQE²R", pour "Haute Qualité Environnementale et Économique dans la Réhabilitation des bâtiments et le Renouvellement des quartiers", a réuni, entre 2001 et 2004, dix organismes ou centres de recherche et treize villes partenaires de sept pays européens : l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, la France, l'Italie, les Pays-Bas et le Royaume-Uni. Ce projet a été co-financé par la Commission européenne dans le cadre du 5^e programme cadre de Recherche et de Développement – Action clé 4 "Ville de demain et héritage culturel". Le partenariat de recherche du projet HQE²R se compose des personnes et organismes suivants : Catherine Charlot-Valdieu (CSTB), Philippe Outrequin (La Calade), Martin Symes, Celia Robbins et Marcus Grant (UWE), Ove Morck (Cenergia), Antonella Grossi et Sandra Mattarozzi (ICIE), Andreas Blum (IOER), Xavier Casanovas et Oriol Cusido (CAATB), Noemi Granado (ITEC), Daniela Gabutti et Nicoletta Ancona (QUASCO), Jan Zieck (Ambit).

Le projet HQE²R s'est fixé comme objectifs de proposer des outils, des méthodes et des guides de recommandations ou de bonnes pratiques pour les opérations d'aménagement ou de renouvellement urbain.

Quatorze quartiers de sept pays européens différents ont servi de cas d'étude pour jeter les bases d'une nouvelle démarche de développement durable à l'échelle des quartiers. Les quartiers d'Angers, d'Anzin, de Cannes, d'Échirolles, de Barcelone, de Manresa, de Cinisello Balsamo, de Mantova, de Melegano, de Vlissingen, de Dresden, de Frederiksberg et de Bristol ont ainsi participé à ce travail.

Six principes ont été définis comme cadre conceptuel par les partenaires pour préciser leur vision d'un "développement urbain durable" :

- efficacité économique incluant les coûts généralement externalisés ;
- équité sociale ;
- efficacité environnementale mettant en valeur les principes de précaution et de responsabilité ;
- principe de long terme conduisant à évaluer l'impact des décisions sur le long terme tout en assurant la réversibilité des choix ;
- principe de globalité – subsidiarité ;
- principe de gouvernance renforçant la participation des habitants et des usagers.

Ces principes ont été extraits des 28 principes retenus lors de la Conférence des Nations unies de Rio de Janeiro en 1992.

Selon la démarche HQE²R, quatre phases trament la conduite d'un projet de renouvellement urbain :

- la vision : identification des problèmes et décision d'agir sur le long terme ;
- l'analyse : réaliser un diagnostic complet et partagé du quartier permettant de faire ressortir les points forts ou faibles et de hiérarchiser les priorités de développement ;
- la conception : définition d'un programme d'actions ;
- la réalisation : mettre en œuvre, suivre et évaluer le plan d'actions.

Les 21 cibles sont regroupées sous 5 objectifs structurants :

- préserver et valoriser l'héritage et conserver les ressources ;
- améliorer la qualité de l'environnement ;
- améliorer la diversité ;
- améliorer l'intégration ;
- renforcer le lien social.

Chaque cible est ensuite déclinée en plusieurs sous-cibles et indicateurs. Au total, 61 indicateurs permettent aux collectivités, urbanistes ou aménageurs d'engager le suivi opérationnel de ces cibles et objectifs.

La démarche HQE²R :
4 phases, 5 objectifs,
21 cibles, 51 sous-cibles
et 61 indicateurs pour
traduire 6 principes de
développement durable
dans le cadre d'opérations
de renouvellement urbain.

Quartier de la Roseraie



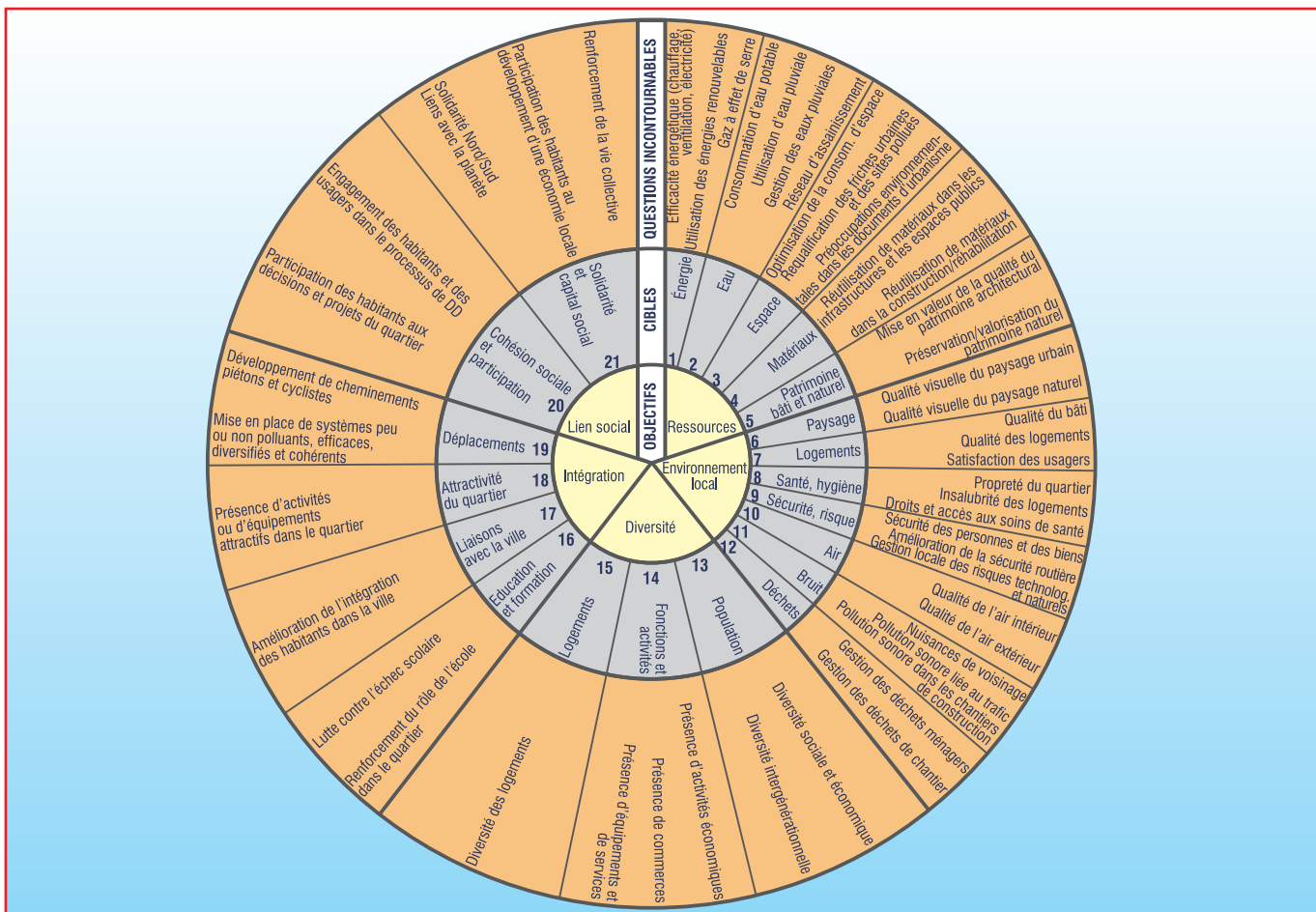
1

Localisation du quartier dans la ville



2

1. Un des 14 quartiers du projet HQE²R : la Roseraie à Angers.
2. Localisation du quartier de la Roseraie dans la ville.



2 Le cercle HQE²R du développement durable urbain (sur un concept original de David Mowat, résident de "Community at Heart" - Bristol, Royaume-Uni).

À l'image du Système de Management Environnemental décliné dans le cadre des opérations HQE[®] de construction ou de réhabilitation, la démarche HQE²R s'appuie sur le cadre offert par les normes ISO 14001 et 14004.

Selon les partenaires du projet HQE²R, quatre phases trament la conduite d'un projet d'aménagement ou de renouvellement urbain :

• La vision :

- perception des problèmes ;
- émergence des projets conduisant à la décision d'agir.

Il s'agit principalement au cours de cette étape d'affiner la politique environnementale du maître d'ouvrage sur base éventuellement d'un Agenda 21 local ou tout au moins du Projet d'aménagement et de développement durable développé en France dans le cadre du Plan local d'urbanisme faisant office de réglementation urbanistique locale.

• L'analyse :

- analyse, à partir d'un état des lieux, des points forts et des points faibles ;
- élaboration d'un diagnostic partagé de développement durable ;
- définition des enjeux et des priorités de développement.

Le diagnostic partagé de développement durable fonde le point de départ de la démarche HQE²R. "Il doit amener le maître d'ouvrage à définir des priorités et des objectifs locaux de développement durable pour le projet d'aménagement ou de renouvellement urbain, à l'issue d'une phase de concertation et d'analyse"¹. Ce travail s'appuie sur les 21 cibles et le système de 61 indicateurs développés de manière générale dans le cadre du projet de recherches. Le système ISDIS "Issues and Sustainable Development Indicators System" est exploité à cette étape pour délivrer un état des lieux le plus objectif possible. Pour élargir la lecture issue de ce diagnostic et adapter la méthode au contexte d'opération, il s'avère indispensable d'organiser les échanges entre les habitants ou les usagers du quartier et les services de la collectivité publique. Pour Catherine Charlot-Valdieu du Centre scientifique technique du bâtiment (CSTB), l'organisation de la participation lors de la réalisation du diagnostic partagé constitue l'une des clés de toute démarche de développement durable.

• La conception :

- recherche et analyse de solutions ;
- définition d'une stratégie, d'un plan ou d'un programme d'actions.

Le plan d'actions d'un projet urbain d'aménagement ou de renouvellement urbain traduit les priorités à développer en matière de développement urbain. Programme général de l'opération urbaine, il doit préciser les modalités fonctionnelles de transformation du quartier et de foncier, de procédures à suivre (notamment de participation), les mesures d'accompagnement social, de communication, d'urbanisme, les moyens financiers à dégager...

• La réalisation :

- mise en œuvre du projet et de sa vie en œuvre ;
- évaluation en continu du projet et de son développement.

Trois modèles d'évaluation ont été développés par les partenaires du projet HQE²R pour opérer l'évaluation des projets urbains : le modèle ENVI sur l'impact environnemental des projets ou scénarii, le modèle INDI d'indicateurs de développement durable pour l'évaluation et le choix des projets, le modèle de simulation ASCOT permettant de comparer en coût global un bâtiment durable avec un bâtiment de référence. Ces outils répondent aux exigences de la directive européenne 2001/42/CE portant sur l'évaluation environnementale des programmes et plans.

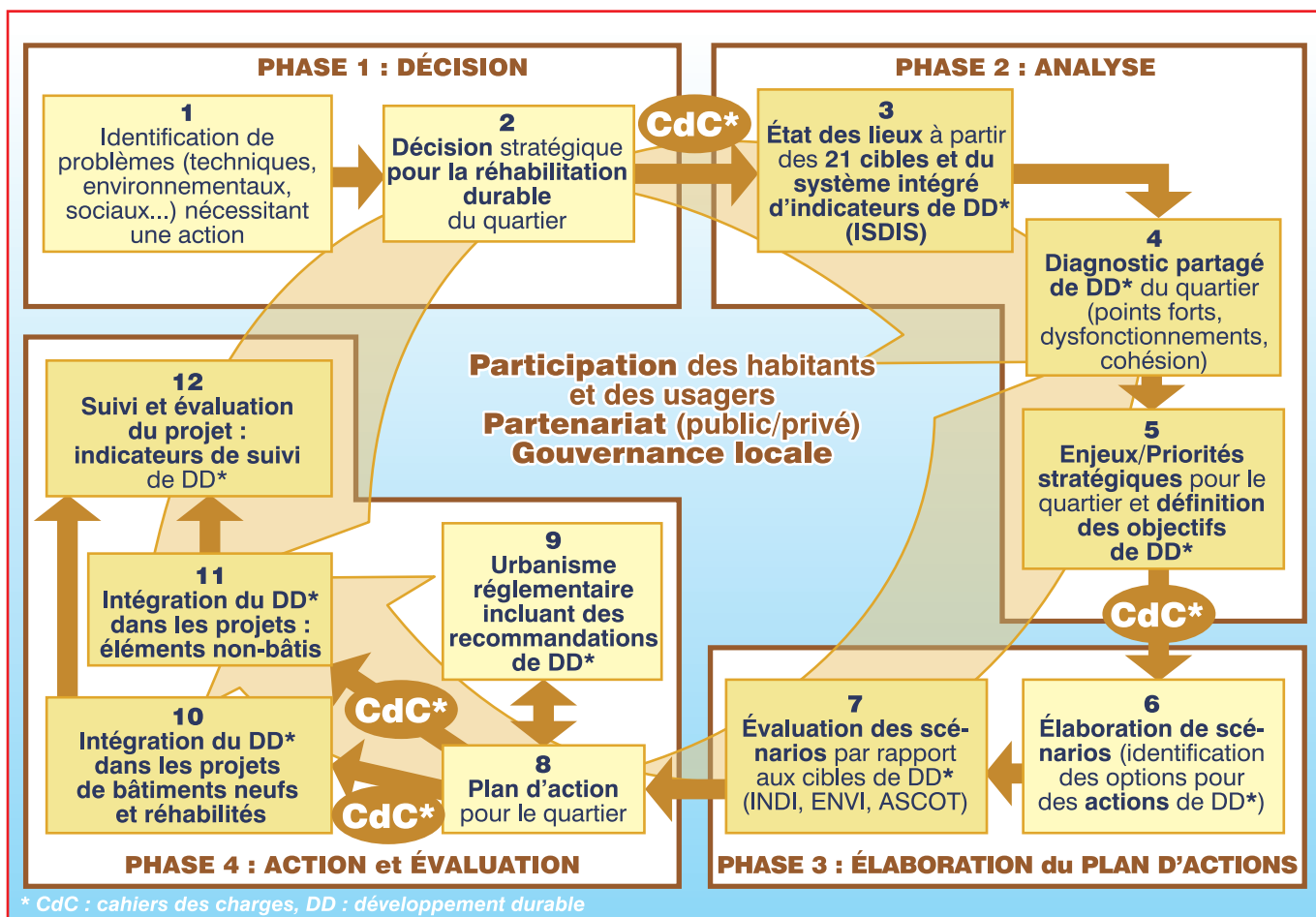
¹ Catherine Charlot-Valdieu, "Présentation de la démarche HQE²R et de ses principaux outils", conférence européenne "Aménagement et renouvellement urbain durable" de Cannes des 2 et 3 février 2004.

La démarche HQE²R propose de développer le management environnemental des opérations de construction ou de réhabilitation de bâtiments à l'échelle des quartiers.

Éléments du quartier	Structure	Usage
Espace résidentiel	Parcs de logements, volume et qualité des bâtiments...	Résidents et usagers : distribution de la population selon l'âge, le statut, la profession, la consommation d'énergie...
Espace non résidentiel	Parcs de bâtiments, volume et qualité des bâtiments...	Types d'usagers venant ou non du quartier...
Espace non bâti	Espaces verts, superficies et qualité...	Utilisation des espaces verts, propreté et sécurité...
Infrastructures	Longueur et qualité des routes, réseaux viaires, qualité et offre de transport public...	Mobilité des habitants, distribution intermodale, flux de consommation d'énergie, d'eau...

Les éléments ou champs d'analyse d'un quartier (source : projet HQE²R, <http://www.hqe2r.cstb.fr>).

1



2 La démarche HQE²R d'intégration du développement durable dans les projets urbains (source : projet HQE²R, <http://hqe2r.cstb.fr>).

Les partenaires du projet européen HQE²R propose une boîte à outils destinée à être utilisée par : des collectivités locales, des élus et leurs services techniques, les bailleurs sociaux, les aménageurs, les établissements publics fonciers, les gestionnaires de parcs immobiliers, les agences d'urbanisme ainsi que les organismes d'État ou associés. Les principaux outils sont disponibles sur le site internet du projet : <http://hqe2r.cstb.fr>

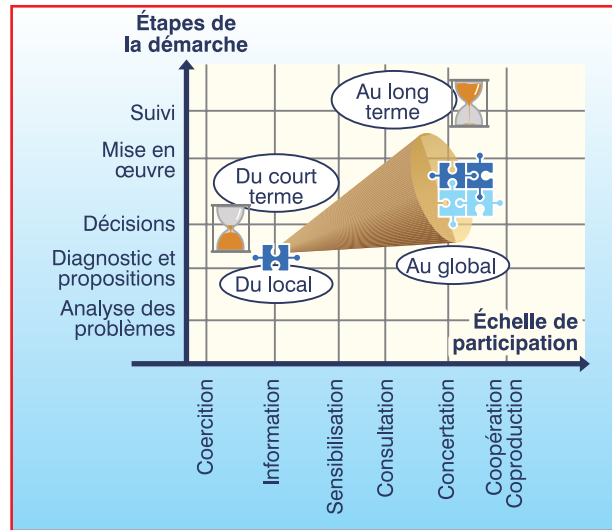
Les outils développés par les partenaires du projet européen HQE²R devraient permettre de répondre aux questions rencontrées aux différentes phases du processus :

- le développement durable est-il pertinent à l'échelle du quartier ?
- quelle réponse de gouvernance apporter par les acteurs d'un processus de renouvellement urbain ?
- quelles sont les caractéristiques d'un quartier ?
- quels sont les enjeux pour le renouvellement urbain durable d'un quartier ?
- comment élaborer un plan d'actions ?
- quelles sont les options pour l'action et sont-elles durables ?
- comment assurer la participation des habitants au plan d'actions ?
- comment s'orienter vers des bâtiments et des éléments non bâtis durables ?
- comment assurer la cohérence entre les projets et les règlements d'urbanisme ?
- comment évaluer et suivre les projets ?

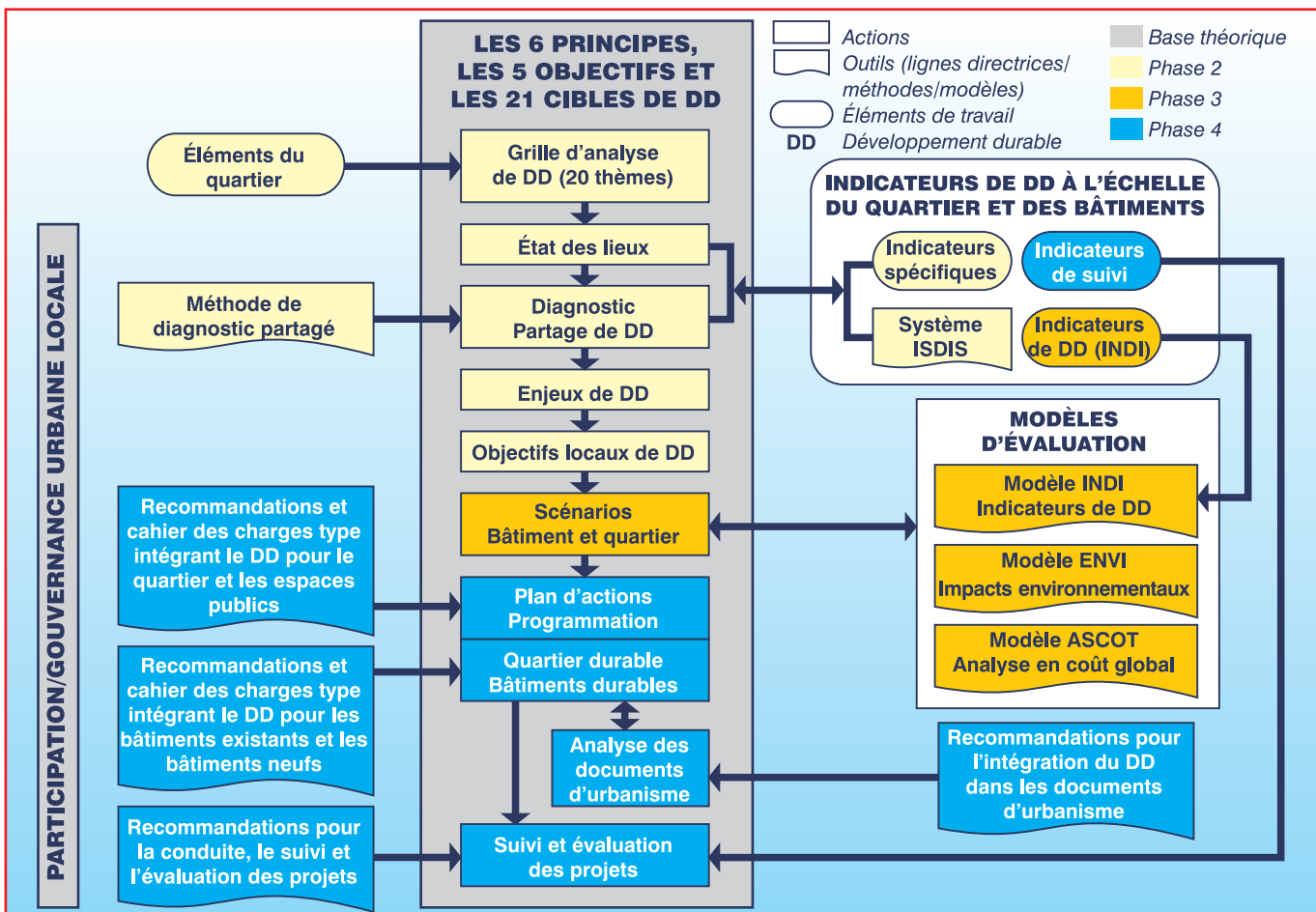
Les méthodes et outils développés dans le cadre de la démarche HQE²R sont dans l'ordre des 4 phases les suivants :

- grille d'analyse ;
- système ISDIS ;
- méthode de diagnostic partagé ;
- recommandations pour améliorer la participation des habitants et des usagers (procédures et pratiques) ;
- recommandations pour l'élaboration du cahier des charges du plan d'actions ;
- outils d'évaluation – 3 modèles : ENVI, INDI, ASCOT ;
- catalogue d'outils d'évaluation existants ;
- recommandations pour intégrer le développement durable dans les documents d'urbanisme ;
- recommandations pour l'élaboration de cahiers des charges de bâtiments intégrant le développement durable ;
- recommandations pour intégrer le développement durable dans les cahiers des charges d'éléments non bâtis ;
- indicateurs de suivi et d'évaluation des actions et du projet.

17 outils permettent d'aborder les 4 phases de la démarche HQE²R : outils de diagnostic partagé, d'évaluation, d'organisation de la participation, d'élaboration du plan d'actions, d'adaptation des documents d'urbanisme, de management de l'opération urbaine...



Les trois dimensions de la participation (d'après le CSTB, La Calade - <http://hqe2r.cstb.fr>).



2 Les outils de la méthodologie HQE²R (d'après le CSTB, La Calade - <http://hqe2r.cstb.fr>).

Les partenaires du projet HQE²R proposent 3 modèles d'évaluation des projets d'aménagement ou de renouvellement urbain à l'échelle des quartiers :

Le modèle ENVI sur l'impact environnemental de projets ou de scénarii :

Le modèle ENVI (ENVironment Impact) a été développé par les partenaires français du projet HQE²R en coopération avec Électricité de France (EDF). Ce modèle prend en compte les paramètres suivants :

- la consommation d'énergie ;
- les émissions de gaz à effet de serre ;
- la consommation d'eau ;
- la consommation de déchets ;
- les quantités de déchets non recyclés et non réutilisés ;
- la consommation d'espace ;
- la valorisation de sources d'énergies renouvelables.

Le but de ce modèle consiste à pouvoir comparer plusieurs variantes entre elles sous le seul regard environnemental.

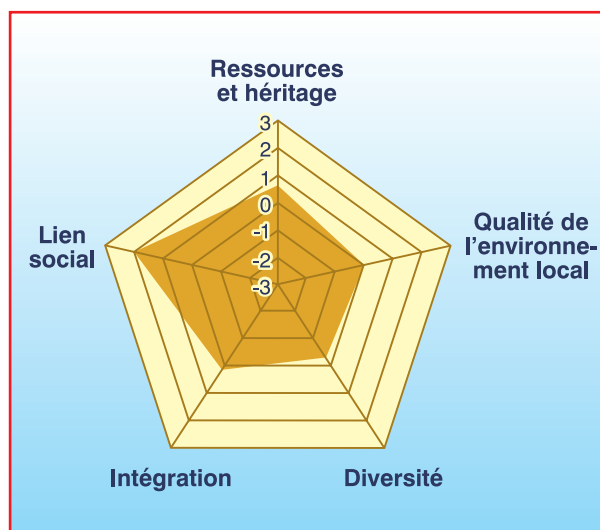
Le modèle INDI d'indicateurs de développement durable pour l'évaluation et le choix des projets :

Le modèle INDI (INDicators Impact) a été construit par Philippe Outrequin (La Calade) à partir des critères retenus pour le système ISDIS. Ce modèle a pour but de constituer une aide à la décision pour prendre en compte et suivre les principaux objectifs de développement durable dans leurs projets urbains. Il permet de modéliser la durabilité d'un quartier en fonction de ses caractéristiques propres, ses points forts et faibles.

Le modèle de simulation ASCOT permettant de comparer en coût global un bâtiment durable avec un bâtiment de référence :

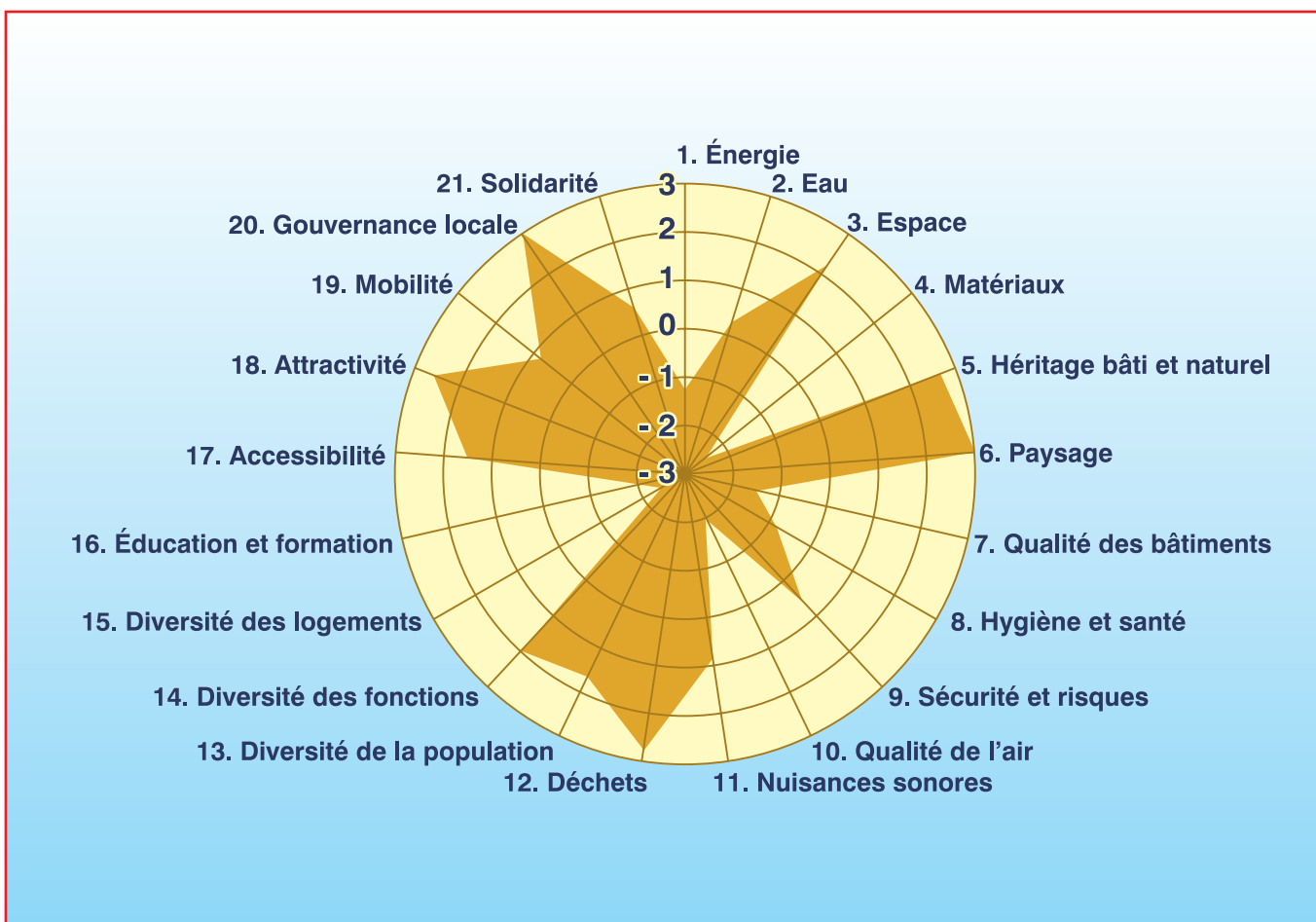
Le modèle ASCOT (Assessment of Sustainable Construction & Technology Cost) a été élaboré par Cenergia (Danemark) et adapté par La Calade (France). Le principal intérêt de cet outil est d'appréhender à l'échelle du bâtiment l'ensemble des coûts directs et indirects résultant du projet. Cet outil reste à développer pour s'adapter à l'ensemble des conditions offertes dans les pays européens.

**3 modèles d'évaluation
 des projets
 d'aménagement ou de
 renouvellement urbain
 servent à qualifier la
 durabilité à l'échelle des
 quartiers : ENVI, INDI,
 ASCOT.**



Exemple de profil d'un quartier pour les cinq objectifs de développement durable (source : base de données CRISP, <http://crisp.cstb.fr>).

1



2 Exemple de profil de quartier pour chacune des 21 cibles de développement durable (d'après le CSTB, La Calade – <http://hqe2r.cstb.fr>).

La nécessité de développer des énergies alternatives au “tout pétrole” s'est révélée cruciale dès le premier choc pétrolier de 1973, dont la flambée des prix a suscité de nombreuses recherches et réalisations dans les années 1970, exploitant avant tout l'énergie solaire. Mais depuis les années 1990, a lieu une prise de conscience à l'échelle planétaire de la question et de son urgence écologique, en plus des enjeux économiques et géopolitiques de la dépendance à un seul type d'énergie.

Le rapport Bruntland (1987) a souligné le lien entre les changements climatiques globaux qui menace la planète et nos choix énergétiques. L'effet de serre, à l'origine du réchauffement de l'atmosphère, est principalement provoqué par les émissions de CO₂ et celles-ci sont dues essentiellement à l'utilisation des énergies fossiles (pétrole et charbon).

Les pays du Nord (et de l'OCDE en général) sont d'énormes consommateurs d'énergie : un seul réfrigérateur américain consomme 6 fois plus d'électricité annuellement qu'un ménage chinois. La consommation de TEP (tonnes équivalent pétrole) d'un nigérien est 20 fois moindre que celle d'un canadien, etc. Or les réserves d'énergies fossiles s'amenuisent : on estime que si la consommation d'énergie continue à doubler tous les 15 à 20 ans comme c'est le cas depuis un siècle, 80 % des réserves fossiles (charbon, pétrole et gaz) auront disparu d'ici à deux générations seulement.

Mais l'absence d'accès à ces énergies est tout aussi dramatique, car c'est alors le bois qui constitue la principale source de combustible pour une part énorme de la population mondiale, et celle-ci augmente de façon exponentielle dans les pays en voie de développement. Or, une cause toute aussi importante de l'effet de serre est la déforestation. Même si la combustion du bois en tant que telle n'émet que très peu de CO₂, ce qui le classe parmi les “énergies renouvelables” dès lors qu'il est produit pour cet usage, les grandes réserves forestières tropicales, comme l'Amazonie et l'Asie du Sud-Est, fonctionnent comme “poumons de la planète”, en absorbant une part importante du CO₂ de l'atmosphère (photosynthèse). En 1990, on estimait que le déboisement était déjà responsable à lui seul de 21 % des émissions mondiales de CO₂¹.

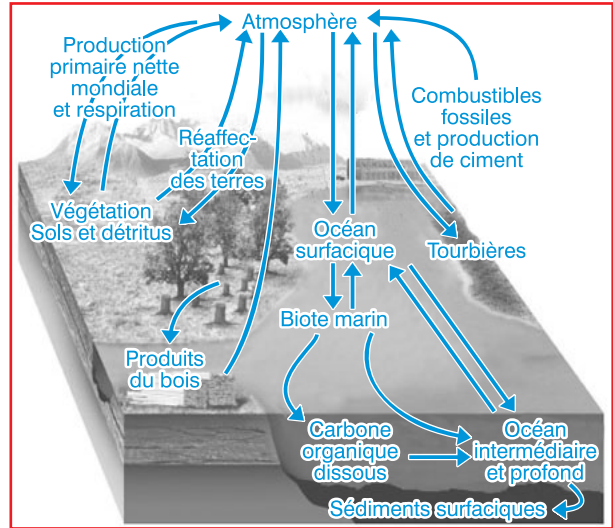
La compatibilité des deux termes de “développement durable” est sans doute ici plus que jamais difficile à réaliser, puisque pour ces pays, l'industrialisation telle que l'ont connue les pays riches est désormais impossible, vu l'augmentation inéluctable des prix de l'énergie, tandis que les solutions choisies en fonction des coûts directs les plus faibles les exposent aux nuisances écologiques les plus grandes. Enfin, le caractère global de la problématique est ici encore capital, puisque quels que soient les efforts de réduction du CO₂ dans les pays riches, ils peuvent être réduits à néant à cause du facteur multiplicateur énorme que comportent les émissions de CO₂ dans les pays du Sud, même en cas d'un faible accès au développement².

Parmi les énergies alternatives, le nucléaire n'est pas considéré par le développement durable, à cause des risques énormes liés à une erreur humaine toujours possible et aux déchets produits. En outre, doubler le nombre mondial de centrales, un investissement immense, ne diminuerait que de 3 % l'émission de CO₂. Les sources d'énergies étudiées sont donc l'hydraulique, l'éolien, le solaire, la géothermie et la biomasse (bois, biogaz, déchets de l'agriculture, telle que la bagasse, issue de la canne à sucre).

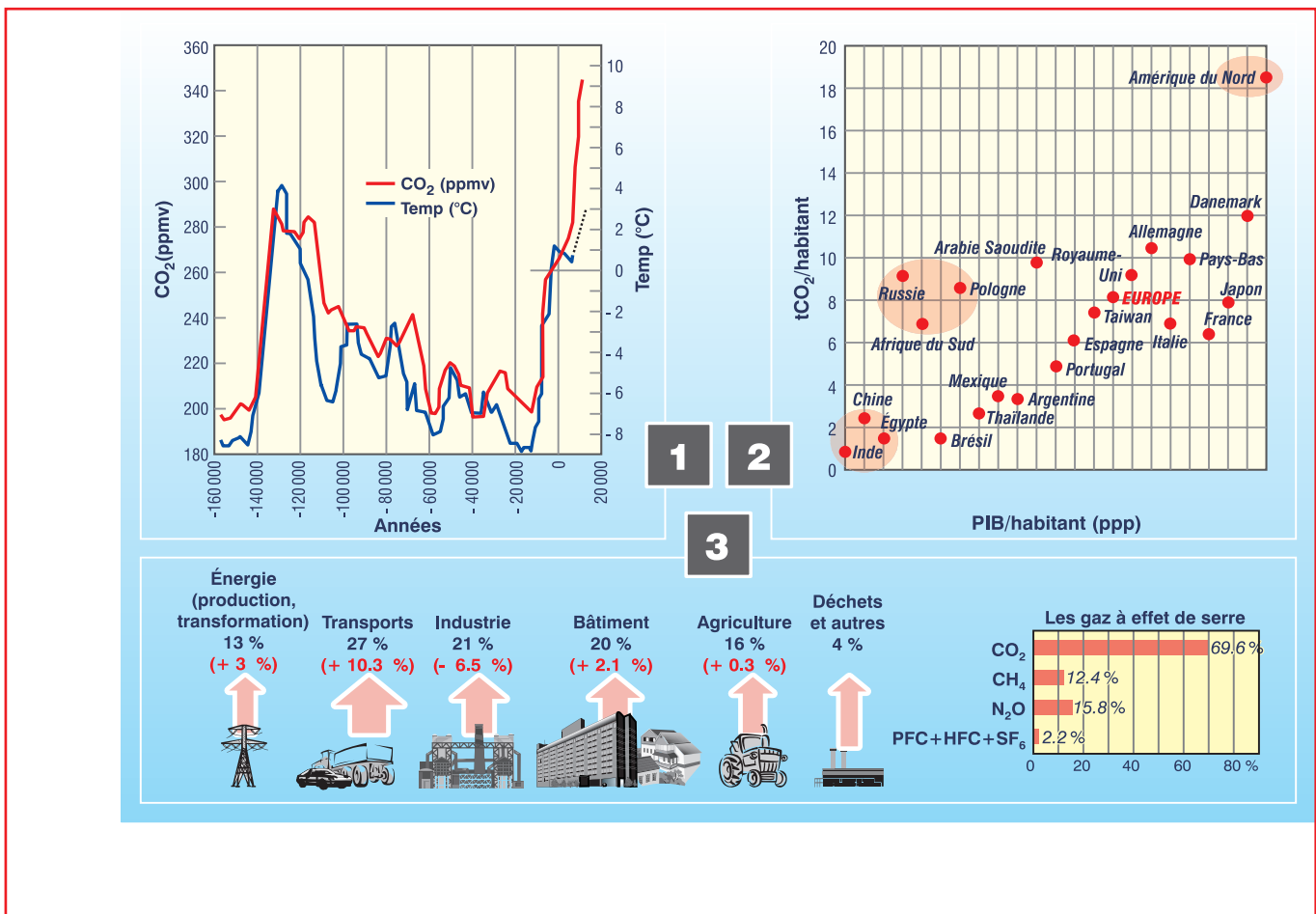
1 Jean-Paul Déléage, “Maîtriser l'énergie pour un monde équitable”, Genève : revue *Sebes*, 1992, p. 13 à 18.

2 Alain Liébard, “Une vision d'énergies renouvelables”, rencontre-débat du Comité 21, 9 oct. 2002.

Nos choix énergétiques influencent directement les changements écologiques et climatiques planétaires. Pour diminuer l'effet de serre, il s'agit de modérer l'émission de gaz tels que le CO₂, la consommation d'énergie, la déforestation.



Le cycle du carbone (source : http://www.nrcan.gc.ca/cfs-scf/science/brochure_carbon_budget/global_f.html).



1. Évolution du gaz carbonique et de la température (source : Lorius, CNRS, 1990).
2. Émission de CO₂ en fonction du PIB par habitant en 1995 (source : Enerdata, 1998).
3. Part relative des activités dans les émissions de GES (gaz à effet de serre) en France et leur croissance en l'absence de mesures nouvelles (source : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique - CITEPA 2000).

Le fonctionnement des réseaux de chaleur ou de froid exploitant des énergies renouvelables n'est pas différent de ceux utilisant des énergies fossiles. Dans chaque cas, il s'agit d'une chaudière ou d'un moteur de climatisation qui est connecté à un réseau de canalisations destiné à alimenter un ensemble de bâtiments dans lesquels sont installées des sous-stations qui vont diffuser l'énergie utile (chaleur, eau chaude ou froid).

En fonction des ressources locales disponibles autour d'un site, plusieurs types d'énergies renouvelables peuvent être exploitées pour alimenter des réseaux : bois énergie, géothermie, énergie solaire, biogaz et même les courants marins.

Les avantages des réseaux

En milieu urbain, le concept de réseaux possède des avantages réels par rapport au choix d'installations décentralisées par bâtiment. Sur le plan économique, les réseaux permettent des économies aux niveaux des coûts d'investissement et de maintenance des installations. Les réseaux participent aux réductions des charges ce qui est un atout, notamment dans le logement social.

À ces premiers avantages viennent s'ajouter ceux liés à l'exploitation d'énergies renouvelables. En effet, la valorisation de ressources locales donne lieu à :

- une diminution des consommations d'énergies fossiles, ce qui participera à une réduction des coûts d'exploitations et à une amélioration de la qualité de l'air ;
- la création d'activités économiques locales provenant de l'exploitation des secteurs renouvelables.

Penser les réseaux

La réalisation de réseaux de distribution d'énergie à partir de sources renouvelables fait partie intégrante des politiques d'urbanismes. De tels réseaux peuvent structurer l'organisation de quartiers et il est donc important de bien les concevoir. Parmi les paramètres à prendre en compte, les plus importants sont les besoins à couvrir (qui détermineront les capacités installées) et la disponibilité des énergies renouvelables locales pouvant être exploitées. Par ailleurs, l'enfouissement du réseau est également une étape délicate qui sera d'autant moins complexe si elle est appréhendée tôt dans un schéma de développement urbain.

Quelques exemples

Les meilleurs exemples de réalisations proviennent d'Europe du Nord.

Concernant les réseaux de chaleur à partir d'énergies renouvelables on peut citer la ville suédoise de Kungälv qui profite d'un réseau couplé à la plus grande chaufferie solaire de l'Union européenne (10 000 m² de capteurs solaires thermiques). En Finlande, le site d'Ahlolmens Kraft exploite une chaudière de 550 MW alimentée à partir de bois. Cette installation, qui est la plus importante au monde en la matière, valorise une partie de sa production à travers un réseau de chaleur.

En matière de réseau de froid, Lund (Suède) possède un réseau de climatisation développé à partir de pompes à chaleur géothermales exploitant les différentiels de température entre l'air ambiant et celle de la mer baltique.

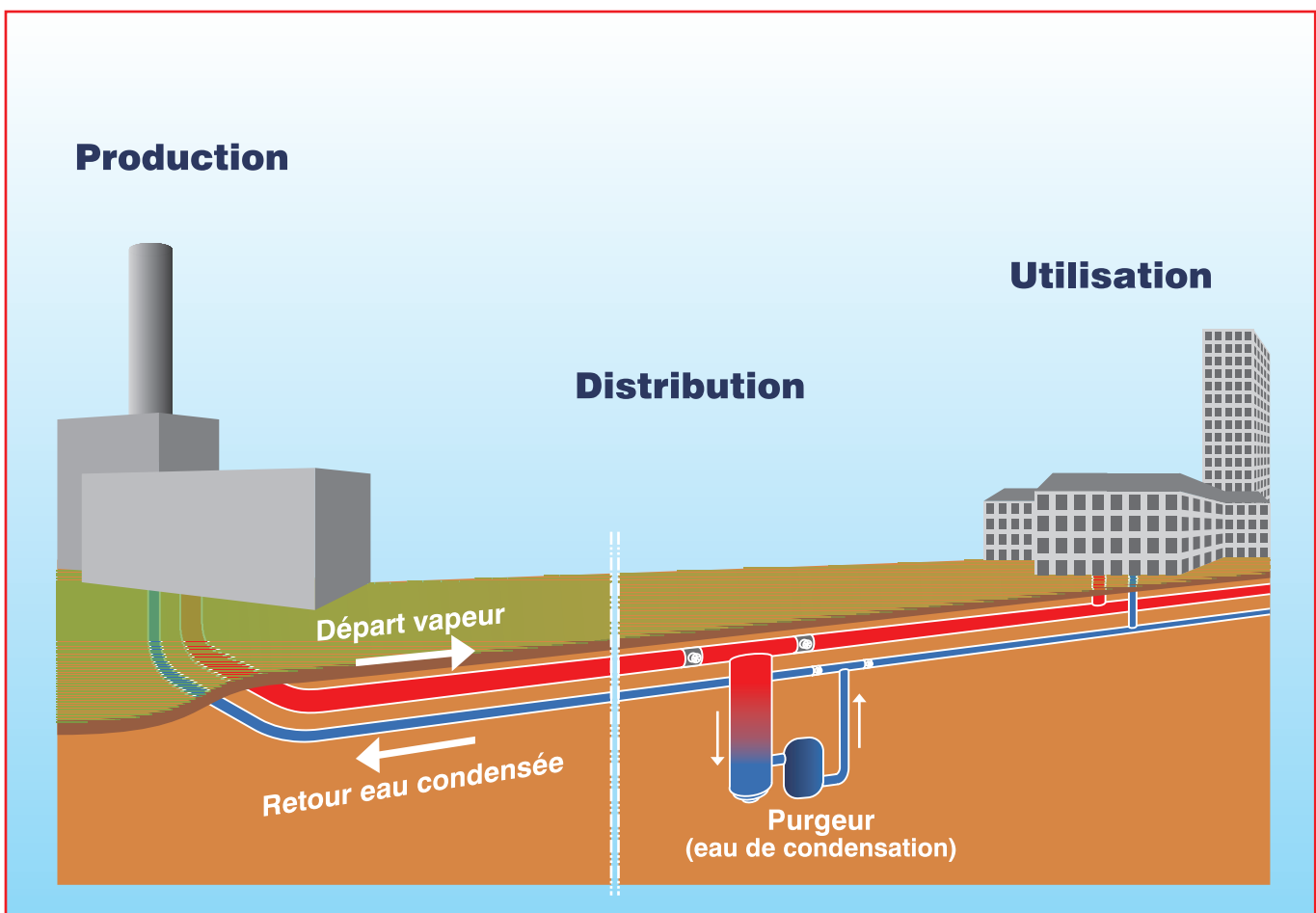
Plus original, la ville de Stockholm possède un réseau de climatisation utilisant l'eau des courants froids d'eau de mer afin de lutter contre la chaleur de l'été.

La France, quant à elle, ne possède actuellement pas de réseau de froid à partir d'énergies renouvelables. En revanche, le pays compte plusieurs installations de réseaux de chaleur dont les plus importantes sont les sites de la Poterne et de Villeneuve dans l'agglomération grenobloise. Depuis 1994, ces chaufferies développent des puissances respectives de 72,5 et 63 MW à partir de bois - énergie.

Principalement impulsés par les pays du Nord de l'Europe, les réseaux de chaleur ou de froid à partir d'énergies renouvelables sont de plus en plus nombreux en milieu urbain.



1 Le réseau de chaleur de Kungälv (Suède) alimenté, en partie, par les 10 000 m² de capteurs solaires thermiques.



2 Schéma explicatif d'un réseau de chaleur.

De nombreuses techniques basées sur l'énergie solaire se développent aujourd'hui pour satisfaire les besoins en électricité et en chauffage. La principale différence des énergies renouvelables est qu'elles sont de type "flux", alors que les énergies traditionnelles nous ont habitué à penser en terme de "stocks", de réserves, de gisements, d'accumulation (pétrole, charbon, gaz, uranium). Elles ne sont donc pas directement comparables (les deuxièmes sont polluantes, les premières ne permettent pas d'assurer les "pointes" de consommation) et doivent au maximum être utilisées en complémentarité. En Allemagne, les installations domestiques mixtes (solaire voltaïque ou thermique couplé au gaz par exemple) sont courantes.

En ce qui concerne la production thermique, il existe de grandes centrales utilisant des capteurs solaires qui concentrent les rayons du soleil : ils produisent de la vapeur qui actionne une turbine et celle-ci génère de l'électricité. Cependant, ces centrales dépendent d'une très bonne situation géographique. La centrale européenne la plus importante se trouve dans le Sud de l'Espagne. Le "solaire thermique basse température", par contre, est utilisé au niveau individuel sous des latitudes plus variables. Il permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire et, en France, la production combinée de chauffage par le biais d'un plancher chauffant (plancher solaire direct)¹.

Les capteurs thermiques vitrés se comportent comme une serre : les rayons du soleil traversent un panneau de verre pour atteindre des absorbeurs métalliques, auxquels ils cèdent leur énergie. La chaleur est transmise à des tuyaux de cuivre, réchauffant le fluide qui y circule. Celui-ci est acheminé vers le ballon de stockage par des canalisations et, après avoir réchauffé l'eau sanitaire, le fluide retourne vers la source de chaleur afin de se "recharger" en énergie. L'eau du ballon de stockage pourra être utilisée de jour comme de nuit. En France, ce chauffe-eau peut fournir, en moyenne sur l'année, 65-70 % des besoins au nord de la Loire et 75-80 % au sud.

La technique "photovoltaïque" consiste à produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire qui chauffe un semi-conducteur (du silicium). Des modules, formés par ces cellules de silicium, encapsulées pour les préserver de l'humidité et des chocs, sont assemblés sur une surface bien orientée. Un onduleur peut convertir le courant continu en courant alternatif (220 volts). Le système est relié au réseau électrique de distribution : il peut alimenter directement les appareils électriques ou être stocké en batteries.

Le courant produit peut alimenter des sites isolés ou le réseau de distribution générale. Dans le premier cas, les applications sont énormes dans les pays en voie de développement (éclairage, pompage, réfrigération), où la desserte des grandes étendues rurales par un réseau de distribution d'énergie est beaucoup trop chère². Le cas du couplage au réseau général est fréquent par contre en milieu urbain et industrialisé. Dans ce cas, l'excédent produit par l'installation passe dans le réseau public, et celui-ci complète les besoins en cas d'insolation insuffisante.

Il est intéressant de remarquer que ceux qui s'engage dans l'énergie renouvelable, passent ainsi de simples consommateurs à producteurs occasionnels. Cependant, une fois sur le réseau, il est impossible de dire si l'électricité consommée provient ou non d'une source renouvelable. C'est pourquoi une réflexion importante est en cours concernant la gratification de ceux qui font ce choix, que ce soit les fournisseurs d'électricité (certificats) ou les consommateurs (bonus qui compenserait en partie le surcoût).

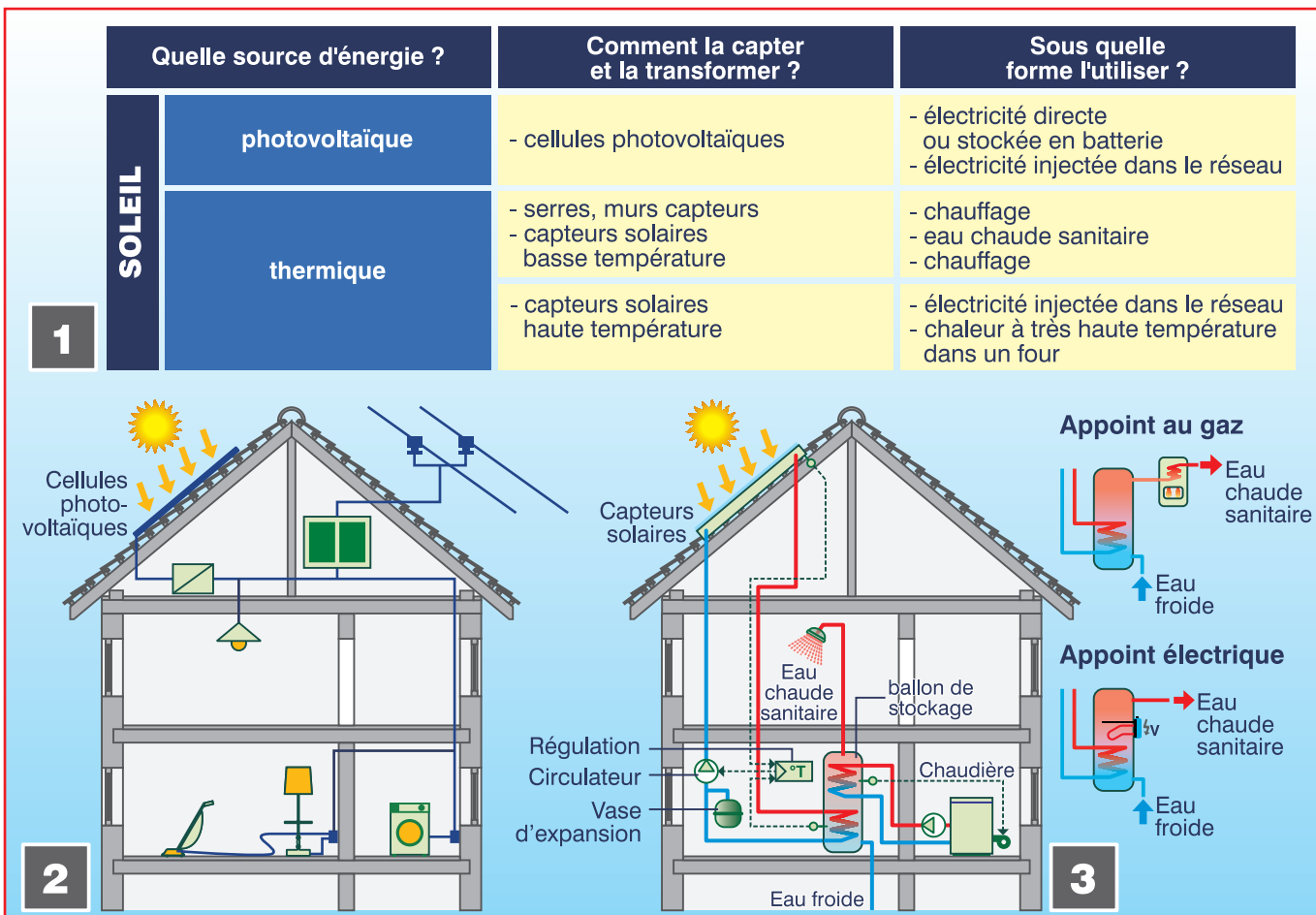
1 Cf. fiches pédagogiques sur le site <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/SomFich.asp#>

2 Philippe Malbranche, "Focus sur le développement du solaire photovoltaïque", débat national sur les énergies renouvelables, 3^e table ronde, Rennes, 5 mai 2003.

L'énergie solaire s'utilise pour produire de l'électricité, via des cellules photovoltaïques, et de la chaleur, via des capteurs solaires. En France et en Belgique, elle est largement sous-utilisée par rapport à d'autres pays comme l'Allemagne ou l'Autriche.

Pays	% de croissance en 1999	1999
Allemagne	19,1	2 750,2
Autriche	7,2	2 020,0
Grèce	2,8	1 975,0
France	-6,6	579,7
Italie	-3,8	255,0
Danemark	7,0	219,0
Pays-Bas	12,4	214,2
Grande-Bretagne	-2,0	195,0
Espagne	-4,7	181,0
Portugal	-7,5	160,2
Suède	6,4	149,0
Finlande	-7,2	67,5
Belgique	1,3	38,0
Irlande	0,0	1,5
Luxembourg	0,0	1,0
Total U.E.	7,3	8 806,3

Surfaces de capteurs solaires thermiques installés dans l'Union européenne (en milliers de m²).



1. Sources d'énergie solaire. 2. Fonctionnement d'un système photovoltaïque. 3. Fonctionnement d'un système thermique. (source : <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/fiches>).

Le bâtiment est un secteur non négligeable dans la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre (GES) et ce, non seulement à cause de ce qu'il consomme en énergie (électricité et chauffage) en régime d'utilisation, mais aussi dès le processus de construction : plus de 10 % des émissions de CO₂ et presque 20 % de l'émission de dioxyde de soufre proviennent de la phase de construction du bâtiment.

Aussi, une des premières réflexions à prendre en compte concerne les matériaux de la construction, car leur fabrication même est à la source de taux d'émissions variables de GES (cf. tableau sur l'énergie prise). En outre, on peut également considérer à quel point ils sont recyclables ou issus d'un recyclage et organiser une réelle gestion des déchets de chantier¹ : ainsi, les panneaux de bois et les pièces de bois de dimensions courantes peuvent être récupérés pour être utilisés comme matières premières dans des procédés de fabrication. De même, les matériaux des cloisons sèches forment un gros contingent de déchets de construction dans les sites d'enfouissement, alors que des systèmes de cloisons démontables, permettront de remettre à neuf et de réemployer ces cloisons. Les chutes de grandes dimensions peuvent être récupérées et les plus petites pièces peuvent être traitées pour fabriquer de nouveaux produits, pour stabiliser le sol ou même comme litière d'animaux.

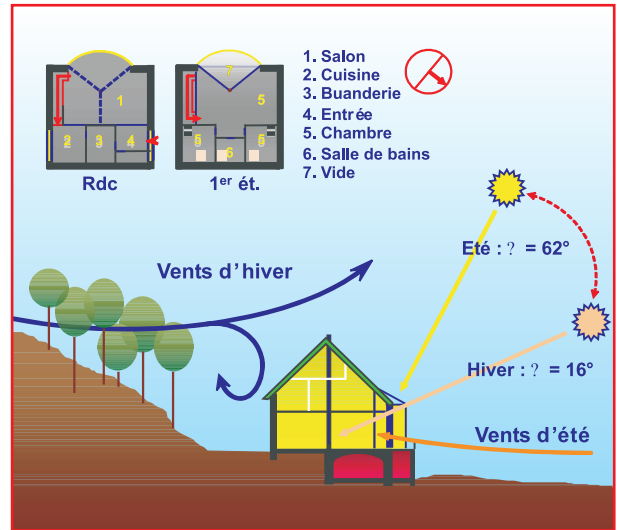
Le projet peut également prendre en compte, dès l'amont, des facteurs qui réduiront les consommations d'énergie telles que l'orientation, la compacité, les qualités de l'enveloppe, la ventilation naturelle, l'accumulation de la chaleur, la récupération des eaux de pluie, etc. : ce qu'on appelle la conception bioclimatique (cf. tome 2).

Par ailleurs, la fonction du bâtiment joue un rôle important pour déterminer les besoins énergétiques : un lieu de spectacle, par exemple, doit couvrir des pics momentanés mais bénéficie d'apports de chaleur par les occupants ; les bureaux bénéficient, quant à eux, d'apports caloriques par les équipements. C'est souvent le logement qui a les besoins énergétiques les plus importants et étalés dans le temps. Le type de maîtrise d'ouvrage n'est pas neutre non plus : une collectivité locale tout comme le propriétaire de sa maison font des choix dont la rentabilité est à plus long terme qu'un promoteur privé ; ou dont les critères ne sont pas purement économiques : ainsi, le surcoût de l'installation d'une chaudière à bois par rapport à celle au fuel est compensé en 3 ou 4 ans, ensuite elle est meilleur marché à l'usage, et ne contribue pas à augmenter l'effet de serre. Enfin, des solutions sont plus adaptées à des projets à plus grande échelle (logements collectifs, crèche, nouveau quartier), tel qu'un réseau de chaleur ou l'exploitation de la géothermie : malgré des potentiels importants (notamment dans toute la région parisienne) celle-ci est largement sous-utilisée.

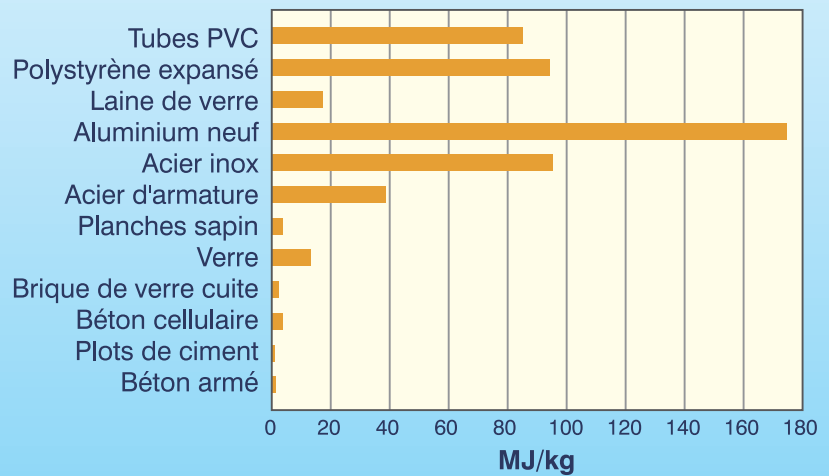
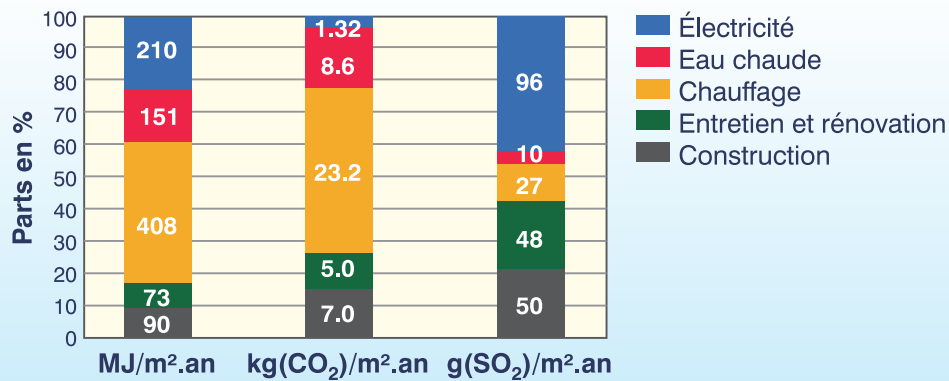
Pour le logement, la solution actuellement la plus répandue est l'énergie solaire : les cellules photovoltaïques pour l'électricité et les capteurs solaires pour la chaleur (eau sanitaire ou chauffage). Des appoints supplémentaires sont possibles, indépendants (cheminée ou groupe électrogène) ou intégrés (chaudière traditionnelle ou raccordement au réseau général). Dans tous les cas, le plus important est de mener la réflexion très en amont : la conception thermique du bâti vise à minimiser les besoins, à tirer le meilleur parti de la situation existante et se calcule précisément. Enfin, il s'agit toujours d'une approche globale, incluant le coût des installations mais aussi celui de la fabrication de matériaux et le prix à l'usage.

¹ *Guide pour une construction et une rénovation respectueuse de l'environnement*, sur le site : <http://www.tpsgc.ca/rps/aes/content/>

Le bâtiment est un secteur qui produit des gaz à effet de serre (GES) et ce, non seulement à cause de ce qu'il consomme en énergie (électricité et chauffage) mais aussi dès le processus de construction : la gestion du chantier et de ses déchets, le choix des matériaux.



Avant tout, une conception globale de l'énergie du bâtiment, prise en amont du projet (source : <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/fiches>).



2 La consommation d'énergie par le bâtiment et par la production des matériaux de construction (d'après J.-B. Gay).

Véritable totem du développement durable, l'éolien en milieu urbain peut signer l'approche développement durable d'un quartier. Son utilisation et son intégration dans les zones urbaines est tout à fait possible pour peu que le gisement éolien s'y prête.

Conditions

La puissance, le nombre et la forme des éoliennes dépendront des spécificités techniques des lieux et des besoins énergétiques liés au projet.

Une étude sur l'énergie éolienne dans un milieu urbain (projet WEB, programme de la Commission européenne Joule III) décrit trois techniques d'intégration génériques dans un environnement urbain :

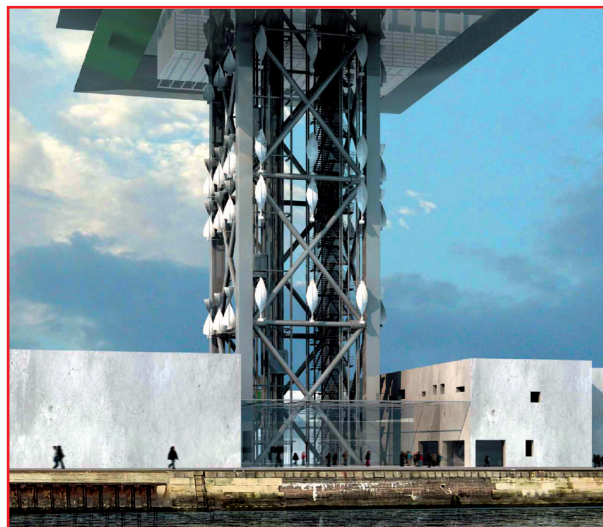
- une première technique consiste à installer une ou plusieurs éoliennes isolées dans un quartier urbain, à l'intérieur ou à la périphérie d'une ville. La plupart des villes modernes disposent de lieux dégagés et exposés aux vents propices. Des éoliennes peuvent être implantées dans un parc municipal, sur un campus universitaire, au milieu d'un fleuve, près d'une zone industrielle ou sur la côte d'une cité maritime. Les éoliennes à trois pales conviennent tout à fait à ce genre d'endroit mais d'autres types d'éoliennes peuvent également être installées (bipale, Darrieus, Savonius). En France, le lycée de Calais dispose de sa propre éolienne. D'autres projets de ce type sont actuellement à l'étude dont celui de Dagenham dans l'est de Londres et celui de Castlemik, près de Glasgow en Écosse ;
- les éoliennes peuvent être installées sur un immeuble déjà existant. Dans ce cas, le choix de la forme de l'éolienne devra s'adapter à l'architecture du bâtiment. Des éoliennes plus discrètes et moins puissantes comme les turbines à axe verticale (type Darrieus et Savonius) sont davantage adaptées à ce type d'application. Parmi les bâtiments équipés de telles éoliennes, on peut citer le Centre d'innovation et d'affaires de Bolzano en Italie et le bâtiment du bureau d'études Ecofys à Utrecht aux Pays-Bas. Douze éoliennes doivent également être installées sur le toit du Centre Nobel à Oslo ;
- une intégration complète dans le bâtiment qui fait des éoliennes les moteurs de la forme architecturale. Dans ce cas, l'architecture des bâtiments ou des ouvrages d'art est conçue en fonction des éoliennes. Le bâtiment joue le rôle de concentrateur de vent en utilisant au mieux l'"effet venturi" grâce à une architecture innovante. Quelques projets de ce type sont à l'étude comme le Centre de la mer situé au port du Havre en France. Des études architecturales ont également été menées dans le cadre du projet WEB et par les cabinets d'architecture Bill Dunster et BDSP Partnership.

Limites

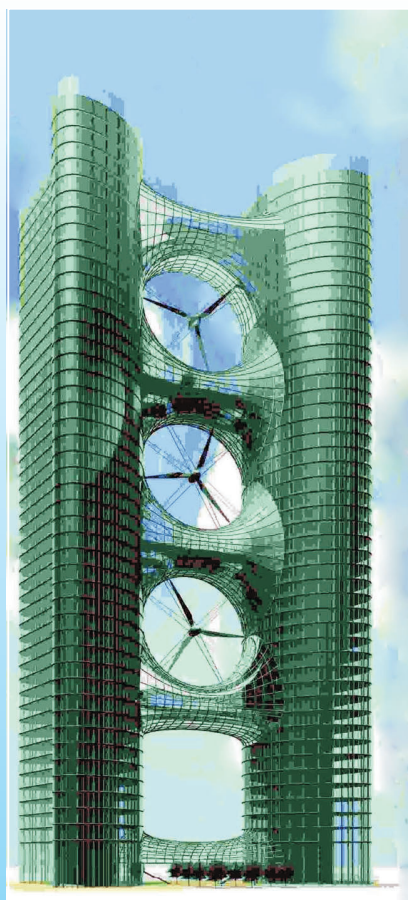
L'intégration d'éoliennes dans un environnement urbain mérite que l'on prenne des précautions particulières pour éviter tout risque de nuisances sonores. De plus, la vitesse moyenne du vent dans les zones urbaines est plus faible (2 à 5 m/s) du fait de l'"effet d'abri", ce qui peut affecter la productivité et donc diminuer la rentabilité économique de ces installations.

Les contraintes environnementales et techniques ne doivent pas être négligées lors de l'élaboration d'un projet éolien urbain. L'insertion environnementale et l'efficacité énergétique doivent être indissociables dans l'élaboration d'un tel projet.

Véritable totem du développement durable, l'éolien en milieu urbain peut signer l'approche développement durable d'un quartier.



Projet d'aménagement du Centre de la mer au Havre, avec 48 petites éoliennes sur le pylône d'une tour. 1



1

2

3

1. Projet d'intégration de l'éolien dans un immeuble en milieu urbain (Project WEB).
2. Éolienne carénée française sur le toit du Field Museum de Chicago.
3. La Neoga®, éolienne urbaine à axe vertical de type Darrieus.

On dénonce aujourd'hui une extension "anarchique" de l'urbanisation, générant le gaspillage d'espaces, le dépérissement de certains quartiers et un surcoût grandissant des infrastructures. En effet, l'étalement urbain demande de nouvelles infrastructures qui ensuite stimulent les nouvelles implantations, engendrent donc toujours plus de consommation d'espace et contribuent à l'effet de serre et à la pollution urbaine à cause de la mobilité.

Si la "compacité" des formes urbaines est devenue le maître-mot elle n'est pas la seule action possible : l'utilisation des terres (espaces naturels, espaces agricoles et ruraux, espaces urbanisés), la répartition des activités (logement, commerce, production...) et le réseau d'infrastructures sont intrinsèquement liés. L'usage raisonné des sols est une question que le développement durable s'efforce de penser "globalement" et transversalement : planification urbaine, modes de transports, besoins en logements, équipements et services, production d'énergie, gestion des déchets, produits recyclables, etc. C'est aussi une réflexion à mener dans le temps et à baliser d'évaluations constantes, via des indicateurs de progression définis au cas par cas.

Deux enquêtes¹ ont placé parmi les interventions les plus utiles, les politiques de "containment" urbain en Angleterre, mais aussi :

- les politiques de revitalisation des centres urbains, voire la création de centralités et d'effet urbain dans des espaces dépourvus de centre ;
- les politiques de réorganisation polycentrique ;
- la planification intégrée transports-occupation des sols, par la localisation de nouvelles ou de grandes concentrations d'activités dans les nœuds importants du réseau et si possible dans des localisations centrales ;
- la résistance croissante à l'ouverture de grands centres commerciaux périurbains (aux Pays-Bas, au Royaume-Uni, et même aux USA) ;
- les politiques de mixité de l'utilisation du sol, afin de contrer la spécialisation fonctionnelle des différents espaces de la ville, qui est une des causes des besoins en déplacements.

Les collectivités locales doivent donc viser à favoriser la création des richesses et leur juste répartition, à chaque échelle. Pour cela², on peut conforter le rôle des bourgs en terme de services de commerces, d'habitat, d'amélioration générale du cadre de vie ; favoriser le développement économique des villes-centres notamment, via la réutilisation des friches industrielles ; développer le lien social et favoriser l'accès au savoir, à l'emploi, aux services et loisirs, en accentuant l'action envers les exclus ; enfin, préserver le commerce de proximité, qui favorise la convivialité des quartiers, diminue les coûts de transports et de pollution, maintient un accès pour les populations à mobilité réduite.

On peut cependant s'interroger sur la difficile adéquation entre l'ampleur de ces objectifs, qui demandent donc des actions volontaristes fortes de la part des politiques urbaines (comme ce fut le cas dans l'exposition Bo01 à Malmö) et par ailleurs, le souci à toutes les échelles de décision, d'évoluer vers un urbanisme "non-directif", qui n'impose pas de solutions mais qui s'attend à ce qu'elles émergent d'une concertation des acteurs ; une évolution qui est aussi au cœur du développement durable.

1 Cf. OCDE, 1995 ; et Camagni, 1996, Roberto Camagni, Maria Cristina Gibelli (dirs.), *Développement urbain durable. Quatre métropoles européennes*, La Tour d'Aigues : éd. de l'Aube, 1997.

2 "Territoires et développement durable", *Guide des collectivités territoriales pour la mise en œuvre d'un développement durable*, 2002, sur le site : comite21.org.

L'usage raisonné des sols est une vaste question que le développement durable s'efforce de penser "globalement" : planification urbaine, modes de transports, besoins en logements, équipements et services, production d'énergie, gestion des déchets, produits recyclables, etc.



1 Nouveau quartier à Malmö (Suède) qui a accueilli l'expo européenne 2001 sur l'habitat durable (source : <http://malmo.se>).

SOCIAL

- participation de nombreux acteurs à des projets pilotes notamment sur la question des transports (entreprises de distribution, transporteurs...)
- connections à l'Internet haut débit de toutes les habitations pour permettre notamment le développement du télétravail
- fonctions domotiques permettant une régulation optimale et confortable notamment en termes d'énergie et de chauffage
- création d'emplois dans le domaine du suivi naturaliste sur le site
- les panneaux solaires seront de la responsabilité d'un opérateur privé limitant ainsi la responsabilité du promoteur

GOVERNANCE

- procédé permanent de diffusion de l'information et des résultats vers le public (ateliers, conférences, articles...) et plus généralement des parties intéressées (politiques, entreprises, société civile...)
- coopération forte entre les architectes, les entreprises et l'opérateur énergétique pour faciliter l'intégration et l'acceptation des cellules photovoltaïques



- propriété : les panneaux solaires seront de la responsabilité d'un opérateur privé limitant ainsi la responsabilité du promoteur et permettant d'être connecté directement sur le système de chauffage de la ville
- contractualisation d'une demande énergétique maximum de 105 kWh/m² (d'où la nécessité de techniques efficaces énergétiquement et d'une information sur l'influence du comportement des utilisateurs) et d'une coopération dans la promotion de carburants propres

ENVIRONNEMENT

- une ville 100 % autosuffisante grâce à diverses sources d'approvisionnement (sources d'eau chaude, panneaux solaires, éoliennes, biogaz...)
- tri et recyclage, récupération du biogaz, récupération de la part organique des déchets...
- priorité aux cyclistes sur les automobiles
- développement du réseau de transports publics avec des carburants propres
- encouragement aux carburants propres des véhicules individuels
- maisons à ossature bois
- liste noire de matériaux à ne pas utiliser dans la construction
- conception pour une utilisation par les habitants la plus écologique possible
- réutilisation possible des matériaux en fin de vie
- création d'habitats écologiques diversifiés (deux parcs, un canal...)

2 Nouveau quartier à Malmö (Suède) qui a accueilli l'expo européenne 2001 sur l'habitat durable (source : <http://malmo.se>).

Les phénomènes d'étalement et de "fragmentation" urbaine sont consommateurs de sol et générateurs de déplacements : les centres commerciaux placés en périphérie, la multiplication des centres de loisirs, l'extension des zones d'activités, le souhait général d'un habitat individuel, etc.

Depuis le livre vert sur l'environnement urbain (CCE, 1990), l'idée est acquise que les formes urbaines compactes sont les plus favorables à un développement urbain durable. En effet, réduire l'étalement urbain, à travers des stratégies telles que réhabilitations, rénovations et requalifications urbaines, ou la recherche de nouvelles typologies de logements, permet de :

- garantir la pérennité des espaces agricoles (600 millions d'agriculteurs dans le monde cultivent aujourd'hui des parcelles en périphérie des villes) ;
- améliorer l'accès de tous aux transports collectifs et donc réduire l'utilisation de la voiture individuelle, la plus grosse productrice de gaz à effet de serre ; par ailleurs, la proximité et la diversité des fonctions offertes par la ville doit aussi favoriser l'utilisation du vélo et de la marche à pied ;
- réduire les coûts directs de raccordement aux réseaux : linéaire de l'eau, de l'électricité, des réseaux d'eaux usées et pluviales, mais aussi les trajets de collecte des déchets, de distribution du courrier, etc.
- réduire les coûts indirects, en particulier les dépenses énergétiques liées aux transports et leurs impacts sur l'effet de serre ; mais aussi réduire la dispersion d'énergie thermique dans la nature grâce à la mitoyenneté ;
- réduire le nombre des zones de limites entre collectivités, des "non-lieux" qui sont souvent sujets à la dégradation des milieux (décharges, rejets).

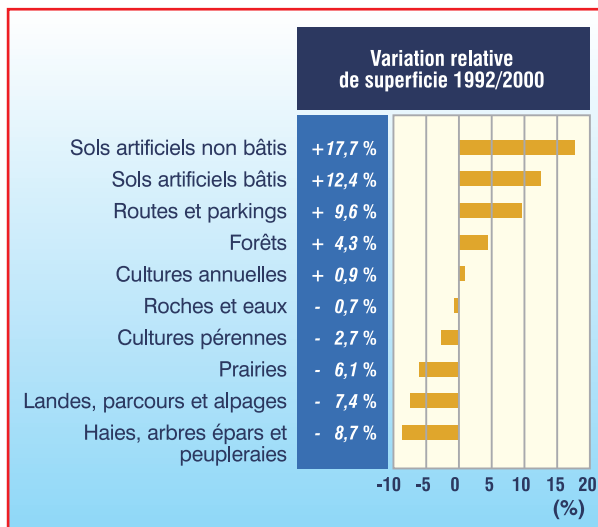
Certains auteurs¹ soulèvent néanmoins des questions quant aux coûts réels, encore non mesurés, de cette compacité : la concentration de plusieurs millions d'habitants et toutes leurs activités économiques dans une ville compacte peut conduire à de graves problèmes de congestion et pourrait contrarier les objectifs de sauvegarde de l'environnement. En outre, de nombreux paramètres, sont souvent négligés : la localisation de l'habitat en relation avec les opportunités de travail ; la diversité des causes de déplacement, outre le travail ; l'absence du critère de proximité dans les choix de logement, etc.

Le modèle polycentrique en réseau serait un objectif plus accessible, dans lequel les fonctions du centre principal sont dispersées en plusieurs sous-centres spécialisés, reliés par des infrastructures de transports publics à des banlieues à densité relativement élevée, dont l'occupation des sols est mixte. Il faut également souligner que les sites les plus propices à cette évolution de densification sont sans doute les plus dépréciés aujourd'hui, à savoir les premières couronnes d'agglomérations : souvent lieux de coupures urbaines, de friches, de nuisances et de problèmes sociaux, ces localisations sont pourtant porteuses de potentiels, comme l'existence de transports publics bien développés et celles des espaces interstitiels, où de nouvelles formes urbaines sont possibles, entre habitat individuel groupé et petits immeubles.

Enfin, il faut remarquer que les questions de formes urbaines ne sont pas envisagées très concrètement actuellement par les collectivités, et sont une grande absente de la plupart des Agendas 21 locaux. Par contre, on trouve du côté de la prospective architecturale et urbaine des réflexions audacieuses (FARMAX, de MVRDV) ou encore, du côté de l'expérimentation (le programme "villa urbaine durable", réalisations financées par le ministère de l'Équipement, France), des recherches porteuses d'innovations en termes de typologies de logement alternatives.

¹ Béatrice Bochet, Giuseppe Pini, "Vues sur la ville", *Observatoire universitaire de la Ville et du Développement durable*, Institut de Géographie de Lausanne, 2002.

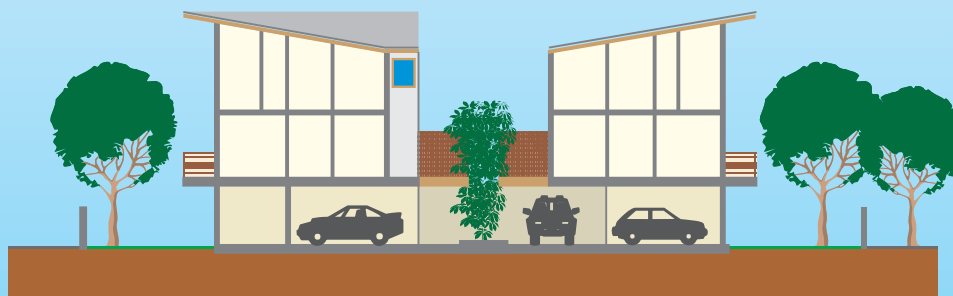
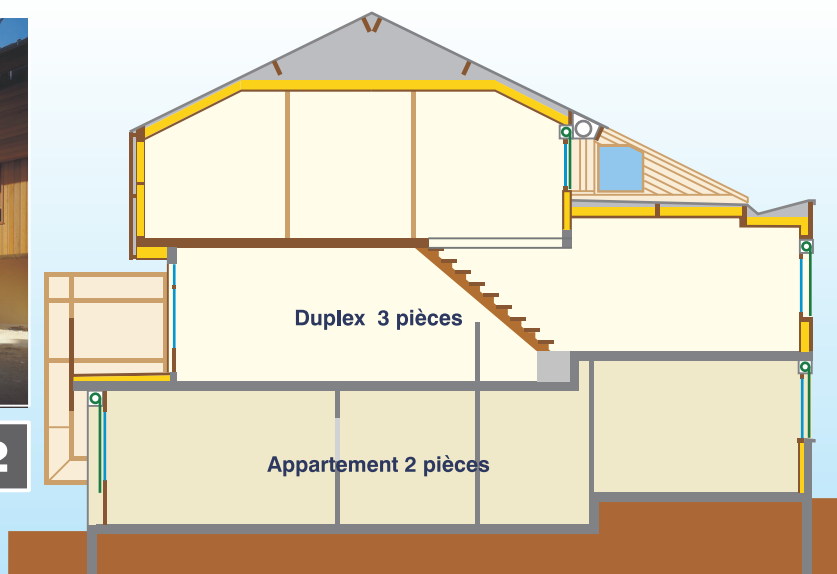
Les politiques de développement urbain durable luttent contre l'étalement urbain à travers des stratégies telles que rénovations, requalifications urbaines et nouvelles typologies d'habitat.



Évolution de l'occupation physique du territoire en France métropolitaine (source : SCEES).



2



1

- 2 Recherches financées par le Plan urbanisme construction architecture (PUCA)
 1. Programme "villa urbaine durable" : "La villa-jardin cache son garage" (architecte : C. Conrad).
 2. Recherche sur "l'habitat intermédiaire" : une alternative entre logement collectif et individuel (architectes : V. Leplat et F. R. Leclercq).

Penser le “végétal” en même temps que l'urbain n'est pas une pratique récente : que ce soit les jardins publics du XIX^e siècle à Paris, dessinés par le Service des promenades et plantations créé par Hausmann, ou le mouvement pour les cités-jardins au début du XX^e siècle, ou la “cité radieuse” de la période moderne, qui dégage le sol, etc. Aujourd'hui, c'est dans un nouveau cadre, celui du développement durable, que l'on pense cette interaction.

La première préoccupation est celle de préserver la biodiversité. Sachant que l'on trouve trente espèces dans une prairie et vingt espèces végétales pour une pelouse fleurie, contre seulement sept pour un gazon tondu et traité par un désherbant sélectif, on tente aujourd'hui de préserver des biotopes favorables, même en ville : le bord des rues, les talus des voies ferrées, les terrains vagues, les haies, etc. À Montréal, certains espaces verts sont conçus pour maximiser leur fréquentation par la faune sauvage, en aménageant des plans d'eau, des rives herbacées, arbustives ou forestières et des herbiers aquatiques, par la plantation de conifères, d'arbustes et d'arbres fruitiers, l'installation de nichoirs et de postes d'alimentation.

Mais les arbres en ville ont d'autres qualités reconnues :

- épuration de l'air (un arbre fixe jusqu'à 200 kg de poussières par an) ;
- abri et nourriture pour les animaux et les plantes ;
- rafraîchissement de l'air (un hectare d'une forêt de châtaigniers “transpire” 40 000 litres d'eau par jour, avec des pointes à 150 mètres cubes) ;
- protection contre les rigueurs du climat (vent, soleil, pluies) ;
- enfin, ils génèrent une plus-value économique aux sites et à l'habitat.

Ainsi, de nombreux projets urbains actuels s'appuient sur une structure de “boulevards urbains” largement plantés, ou s'orientent vers la création de “coulées vertes” dans les villes, afin de ménager une continuité dans les habitats naturels, des couloirs de biotope. On utilise également le végétal pour “coudre” des fractures urbaines, comme par exemple le projet urbain de La Plaine-St-Denis, “paysagé” par M. Corajoud¹.

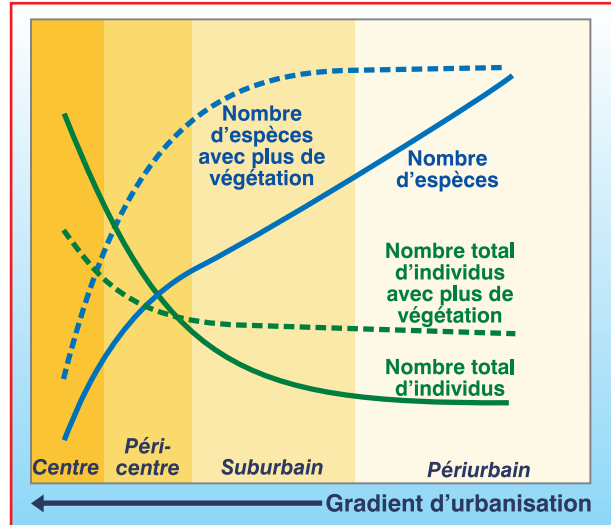
Une évolution essentielle s'est donc produite dans les mentalités : au lieu d'introduire des morceaux de “nature” dans la ville, on tente de regarder l'urbain comme un “paysage”, c'est-à-dire, “une relation qui s'établit en un lieu et un moment donnés, entre un observateur et l'espace qu'il parcourt” (*Encyclopedia Universalis*). C'est ainsi qu'un changement de regard est en cours sur les délaissées, les friches urbaines, les entrées de villes, en termes de potentialités de projet et à traiter autrement que par le “laisser-faire”.

Enfin, une nouvelle notion, les “campagnes urbaines”, propose un plus grand renversement encore². Il s'agit non plus de compacter la ville mais de prendre en compte la mixité grandissante rural/urbain pour l'aménager au mieux des intérêts de tous : agriculteurs, citadins et environnement. Observant que de nombreuses cultures sont possibles dans les espaces d'entre-deux, l'auteur propose de nouvelles pratiques de la campagne qui soient un atout pour les citadins (alimentation bio, loisirs, pêche et cueillette le WE) et qui revalorisent la vie rurale : l'agriculteur devient restaurateur, guide nature, forestier, aquaculteur ou éleveur de chevaux, mais aussi et surtout, paysagiste. En effet, c'est lui qui façonne les paysages recherchés par les habitants, tandis que la ville offre ses services : il faut donc aménager ces interactions entre tissu urbain et agricole, pour envisager l'avenir du périurbain comme un “espace habité” cohérent, et non une somme de fonctions juxtaposées.

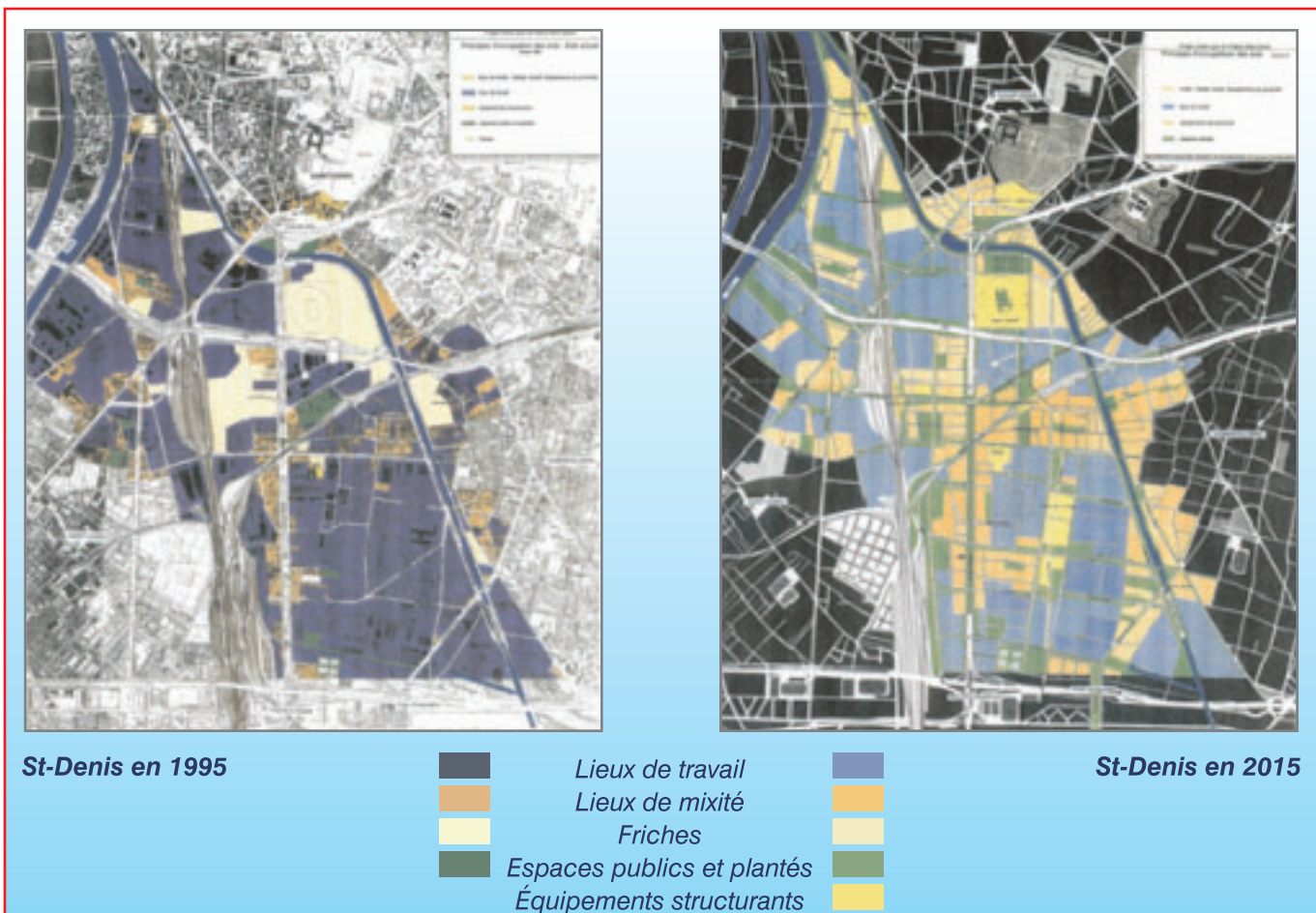
¹ “La Plaine-St-Denis, un projet radicalement simple”, *Projet urbain* n° 15, 1998.

² Pierre Donadieu, *Campagnes urbaines*, Actes Sud/ENSP, 1998.

La végétation en milieu urbain diminue la pollution atmosphérique du milieu, améliore la biodiversité et la qualité de vie. Elle fait de plus en plus partie des éléments structurants des projets urbains.



1 Nombre d'espèces végétales et nombre d'individus en fonction du gradient d'urbanisation (d'après Ph. Clergeau).



2 Le projet urbain de la Plaine-St-Denis, au nord de Paris : un travail sur le paysage, l'espace public et le maillage de dessertes permet de désenclaver cet ancien site de friches industrielles, coupé en 2 par l'autoroute A1.

En France, les transports représentent 35 % de la consommation d'énergie, dont la moitié en ville. Selon les modes de transport utilisés, les impacts environnementaux ne sont pas les mêmes : dégradation de la qualité de l'air, réchauffement climatique, pollution, dégradation du patrimoine, etc. Par ailleurs, quelque soit le mode des déplacements, on considère qu'ils sont source de nuisances croissantes : embouteillages, bruit, perte de temps, stress.

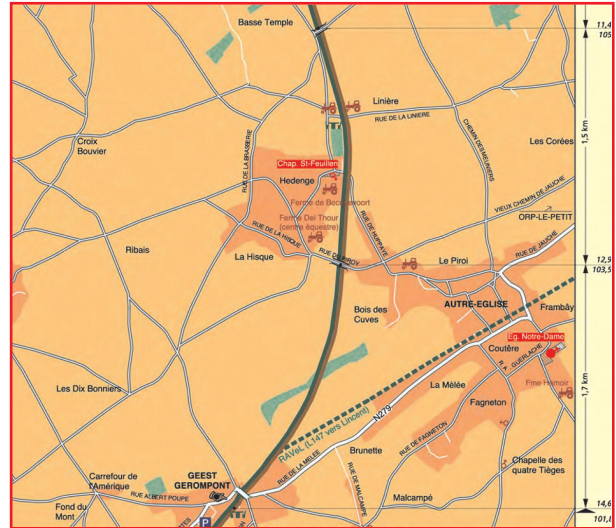
Les objectifs généraux sont donc avant tout de diminuer le nombre et la distance des déplacements, et d'orienter les pratiques vers un usage accru des transports collectifs et des modes de déplacement de proximité (marche, vélo, roller). Bien entendu, cela implique de travailler en synergie sur les formes urbaines : on sait qu'il ne suffit pas de développer l'offre de transports collectifs pour en augmenter la fréquentation et pour diminuer les distances parcourues en voiture. Il ne suffit pas non plus d'améliorer les performances techniques des véhicules (pollutions unitaires) pour régler les problèmes soulevés par la mobilité automobile. Par contre, un ensemble cohérent de mesures peut être envisagé¹ :

- en zones denses, la restriction du trafic automobile et la mise en place de zones piétonnières, en concertation avec les associations des consommateurs et des commerçants, mais surtout, indissociable d'une offre de stationnement et de transports collectifs accrue et d'un plan de déplacement alternatif pertinent ;
- partager la voirie et développer la complémentarité entre les modes de transport : vélo, bus et tramway, automobile, piétons ; la notion d'intermodalité, bien connue du transport de fret, est de plus en plus nécessaire en ville (hangar à vélo à côté des stations de bus, dépose rapide et facile devant les gares, etc.) mais aussi une réflexion sur un système de billets intégrant différents réseaux de transports, intercommunaux, départementaux, régionaux (qui inclurait aussi le stationnement en périphérie) ; ou encore, le développement de "systèmes intelligents" guidant les usagers dans la conception de leurs déplacements, les offres de connexions de stationnement et transport multimodal ;
- le développement des livraisons de marchandises en transports propres (le rail contre la route) ; mais aussi l'optimisation des livraisons en ville, c'est-à-dire "massifier" les flux de marchandises par une organisation des modes de livraison. Cela se traduit par le regroupement sur une plateforme unique des marchandises destinées à la zone à livrer (essentiellement des centres ou hypercentres urbains), ce qui améliore la gestion de la voirie, rationalise les trajets des véhicules utilitaires, assure un meilleur remplissage, diminue le nombre total de véhicules-kilomètres², et réduit les problèmes de congestion urbaine ;
- l'amélioration de l'accès aux transports en commun dans les zones péri-urbaines (desserte et stationnement) et le recours, pour la création de quartiers nouveaux, à des zones bien desservies ; depuis la loi SRU, en France, la taxe transport, prélevée sur les entreprises de plus de 9 salariés, peut désormais être appliquée dans les communes de plus de 10 000 habitants, ce qui devrait favoriser le développement des transports en commun dans les petites agglomérations ;
- on peut également citer le Ravel (Réseau autonome de voies lentes) qui se met en place dans le Sud de la Belgique sur le tracé des anciens chemins de fer vicinaux qui parcouraient les campagnes, et doit permettre aujourd'hui, outre la détente, de rejoindre les villes à vélo depuis les villages suburbains ;
- enfin, l'internalisation des coûts de transports, à l'échelle concernée, et leur communication à l'ensemble des prescripteurs et de la population.

1 Cf. "Territoires et développement durable", *Guide des collectivités territoriales pour la mise en œuvre d'un développement durable*, 2002, sur le site : www.comite21.org.

2 "Expériences innovantes", sur le site : www.agora21.org/equipement/frame-4d.html

Le développement durable vise à diminuer le nombre et la distance des déplacements, à favoriser les transports collectifs et les modes de proximité (marche, vélo), ce qui implique de travailler aussi sur les formes urbaines.



Le réseau Ravel en Belgique propose à la circulation lente des circuits alternatifs reliant les villages (source : <http://ravel.wallonie.be/>).

Reconquérir le centre ville

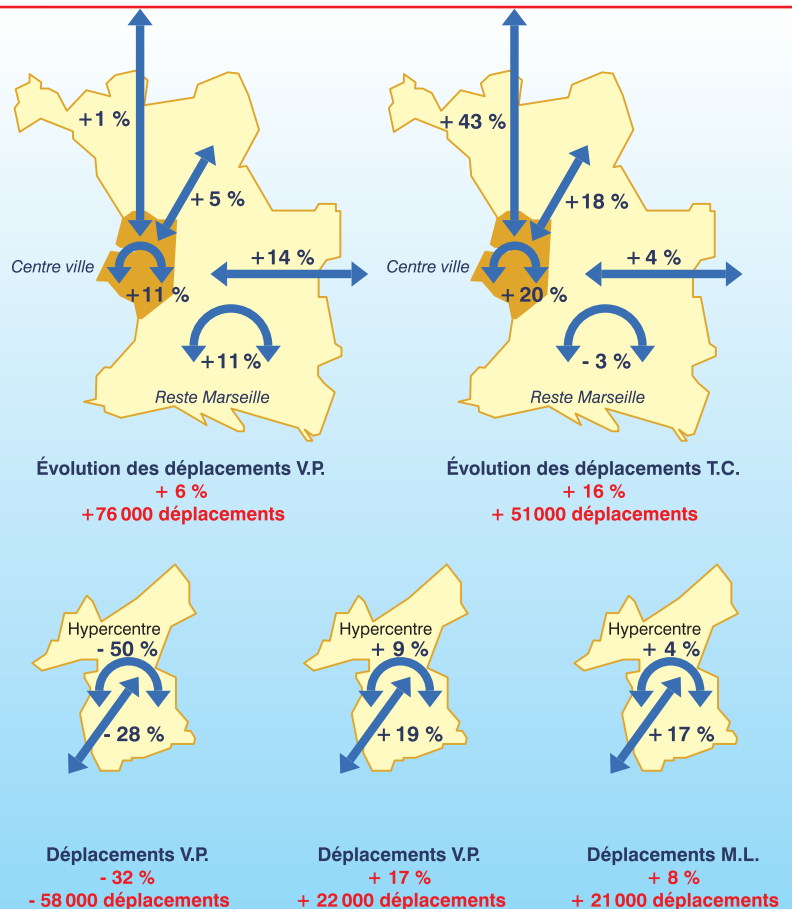
- partager l'espace public
- contourner le centre ville
- développer les transports en commun
- recomposer l'offre de stationnement

Améliorer la qualité de vie

- reconquérir les noyaux villageois
- accompagner le développement urbain
- lutter contre l'insécurité routière
- favoriser les modes doux
- promouvoir les énergies alternatives

S'ouvrir à l'aire métropolitaine

- développer les transports collectifs d'agglomération
- favoriser l'intermodalité
- harmoniser les offres de transports en commun
- organiser le transport de marchandises



2 Le Plan de déplacement urbain de Marseille : les 3 axes structurants du PDU et l'évolution des déplacements (TC = Transports en commun ; VP = Voiture particulière ; ML = Modes lents - marche, vélo, roller).

Appréhender plus finement la demande de transport, qu'elle soit générée par la mobilité domicile/travail ou autre, est aujourd'hui une priorité. L'État belge, notamment, oblige toute entreprise de plus de 100 employés à collecter des informations relatives à la mobilité de ceux-ci pour former une base de données à l'échelle du territoire belge, mise à la disposition des entreprises, régions, communes et des sociétés de transports. Elle profitera à l'entreprise, qui pourra promouvoir son image écologique, et aux autorités qui pourront mettre en place des offres ciblées de transports¹.

Mais des enquêtes² montrent que les habitudes "modales" sont très contrastées suivant les tissus et les agglomérations, que la mobilité domicile-travail est loin d'être la seule, et que si les programmes d'activités générant le déplacement des habitants sont en général divers, complexes et dispersés, il y a néanmoins une forte demande de proximité et un souci de pouvoir s'approprier son voisinage autrement qu'en voiture.

Aussi, ces auteurs avancent que le mouvement inexorable vers le périurbain, la maison individuelle, la propriété, ne serait pas toujours la conséquence des aspirations des habitants, mais parfois aussi le résultat d'autres contraintes. Ils suggèrent de favoriser les conditions propices à la réalisation de grands logements abordables en milieu urbain (pour répondre aux désirs de familles qui se retrouvent en périurbain faute de grands logements accessibles) et au développement de tissus périurbains compacts qui n'imposent pas à leurs habitants la dépendance automobile (pour permettre aux non-motorisés de ne pas être entravés dans leurs activités). Or, ce n'est que dans les couronnes de banlieue proche que ces pistes sont possibles : ils défendent donc un modèle de densité intermédiaire entre ville historique et périurbain diffus.

Parmi les actions en cours, on peut en relever qui concernent l'habitat, comme le "cohousing", au Canada. Ce sont des ensembles qui combinent la privacité familiale et les avantages de la vie en communauté, au moyen de nombreux espaces et services partagés par tous : ateliers, chambre d'amis, salle de jeux, bureaux, mais aussi restaurant, salle de musique, etc. Ce principe réduit la taille des logements individuels et les besoins matériels de chacun, sans diminuer la qualité de vie ; il développe l'intergénérationnel, la prise de décision par collégialité, la solidarité, la sensation de sécurité ; enfin, les conséquences écologiques aussi sont très favorables, avec une utilisation raisonnée de l'espace, des réseaux conçus pour le télétravail, des transports partagés, des choix énergétiques assumés en commun.

En France, on peut citer l'exemple d'une entreprise de Grenoble, ST Microelectronics, qui a déclaré sa volonté de neutralité vis-à-vis de l'effet de serre en 2012. Pour cela, elle a développé, en coordination avec le PDU (Plan de déplacement urbain) de l'agglomération, et sur la base de groupe de réflexion entre employés, un ensemble de seize mesures en 4 volets :

- utilisation des transports en commun : navette gratuite reliant l'entreprise à la gare, participation aux abonnements bus des employés ;
- pour les transports verts : amélioration des infrastructures cyclistes, aide aux motorisations alternatives GNV ou GPL, et covoiturage via intranet ;
- pour les petits déplacements urbains entre les sites de la firme : augmentation du parc de véhicules propres et coordination des déplacements ;
- services de proximité : poste, billetterie de bus, restauration rapide, etc.

1 Béatrice Bochet, *Observatoire universitaire de la Ville et du Développement durable*, Institut de Géographie de Lausanne, 2002.

2 Vincent Kaufman, C. Jemelin et J.-M. Guidez, *Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ?*, La Documentation française, 2001.

Les souhaits des habitants sont plus complexes que la seule tendance pour le périurbain et la voiture ; mais se contenter d'augmenter l'offre de transports publics ne suffit pas à l'inverser.



Une expérience alternative de mode d'habitat : le Cohousing au Canada (source : <http://www.cohousing.ca/index.htm>).

	Île-de-France				Lyon			Strasbourg		Aix-en-Provence	
	Quartier de Paris	Banlieue proche	Ville nouvelle	Péri-urbain	Centre	Banlieue proche	Péri-urbain	Centre	Banlieue proche	Centre	Péri-urbain
Auto-conducteur	13 %	25 %	46 %	68 %	29 %	35 %	64 %	38 %	37 %	29 %	61 %
Auto-passager	3 %	5 %	9 %	9 %	6 %	12 %	14 %	8 %	12 %	6 %	11 %
Transports publics	56 %	44 %	31 %	13 %	34 %	34 %	17 %	18 %	38 %	13 %	11 %
Moto	2 %	2 %	2 %	3 %	1 %	1 %	2 %	1 %	0 %	2 %	3 %
Vélo	7 %	3 %	4 %	6 %	3 %	1 %	5 %	17 %	8 %	6 %	2 %

2 Pourcentage de la population enquêtée utilisant, tous les jours ou presque, ces moyens de transport (d'après V. Kaufmann) (source : www.ietcat.org/htmls/jornadas/pdfs_la ville/texte_kaufmann.pdf).

Non seulement les particuliers, les entreprises, peuvent faire le choix des énergies renouvelables mais des décisions à l'échelle urbaine peuvent également être prises par les collectivités, par l'aménageur d'un quartier, par le promoteur d'un ensemble de logements. Ainsi, on sait que la production de chaleur est la plus grosse consommatrice d'énergie en France : 110 millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole) sont consommés pour produire de l'électricité, 120 millions pour la chaleur, et 40 millions pour les transports.

Aussi, l'Ademe¹ soutient-elle des programmes de valorisation de la biomasse et notamment le développement de chaufferies collectives au bois : 515 d'entre elles fonctionnent aujourd'hui en France pour l'alimentation, directe ou par réseau de chaleur, d'ensembles immobiliers, de quartiers urbains, ou d'équipements publics (hôpitaux, écoles, piscines). 160 000 TEP/an sont ainsi substituées ; 500 000 tonnes/an de CO₂ sont évitées et 500 emplois directs ont été créés. L'approvisionnement des chaufferies collectives urbaines est organisé par des réseaux d'entreprises de collecte/transport/stockage qui mobilisent, annuellement, près de 700 000 m³ de bois, dont environ 20 % d'origine forestière (rémanents d'exploitation) et 80 % sous forme de déchets de transformation (écorces, sciures, broyats de récupération). Le bois est très compétitif en tant que combustible, mais les investissements pour ces chaufferies restent encore plus coûteux que pour les combustibles concurrents, d'où les aides financières proposées.

Par ailleurs, la géothermie est aussi une importante ressource qui reste largement à développer, et qui nécessite l'initiative d'une collectivité ou d'une grosse entreprise. La géothermie à basse ou moyenne énergie est exploitée dans les bassins aquitain et parisien et chauffe aujourd'hui plusieurs centaines de milliers de logements. Mais elle coûte encore cher en termes d'investissement (le temps de retour est estimé à 20 ans), à cause de facteurs techniques (un captage vertical ne peut forer qu'à 1 500 m de profondeur), économiques (le taux de TVA est plus élevé sur les abonnements aux réseaux de chaleur que sur le gaz ou l'électricité) et concurrentiels (d'autres opérateurs présentent sur le marché des énergies moins chères).

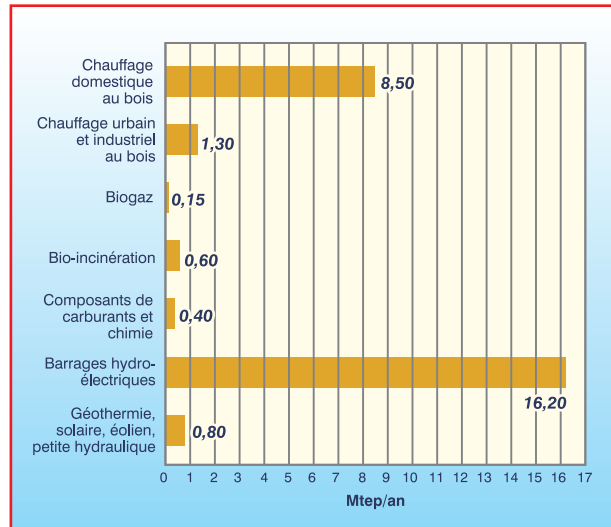
Pour parer à ces déséquilibres, de nombreuses institutions² réfléchissent à des moyens de compensations (telle une "taxe sur le carbone"), pour ceux qui, raccordés à un réseau plus cher, contribuent en fait à diminuer l'effet de serre ; un autre principe qui se diffuse en Europe est celui des "certificats verts", achetés par des clients qui souhaitent afficher leur choix de l'énergie renouvelable et qui sert à financer le surcoût de sa production.

Mais plus généralement, une collectivité locale dispose d'une large panoplie d'actions "d'éco-gestion", dans le double objectif de réduire les impacts environnementaux de ses activités et d'apporter des économies financières directes par la maîtrise des flux et des consommations (eau, énergie, déchets), notamment dans le cadre d'un "Agenda 21" : démarche HQE dans les projets de construction ou de réhabilitation des bâtiments ; recours par la direction des achats aux produits respectueux de l'environnement, mais aussi aux produits issus du commerce équitable ; promotion de l'écogestion auprès des acteurs du territoire : artisans, industriels, consommateurs ; politiques d'accompagnement des PME locales dans la mise en place d'outils de gestion environnementale.

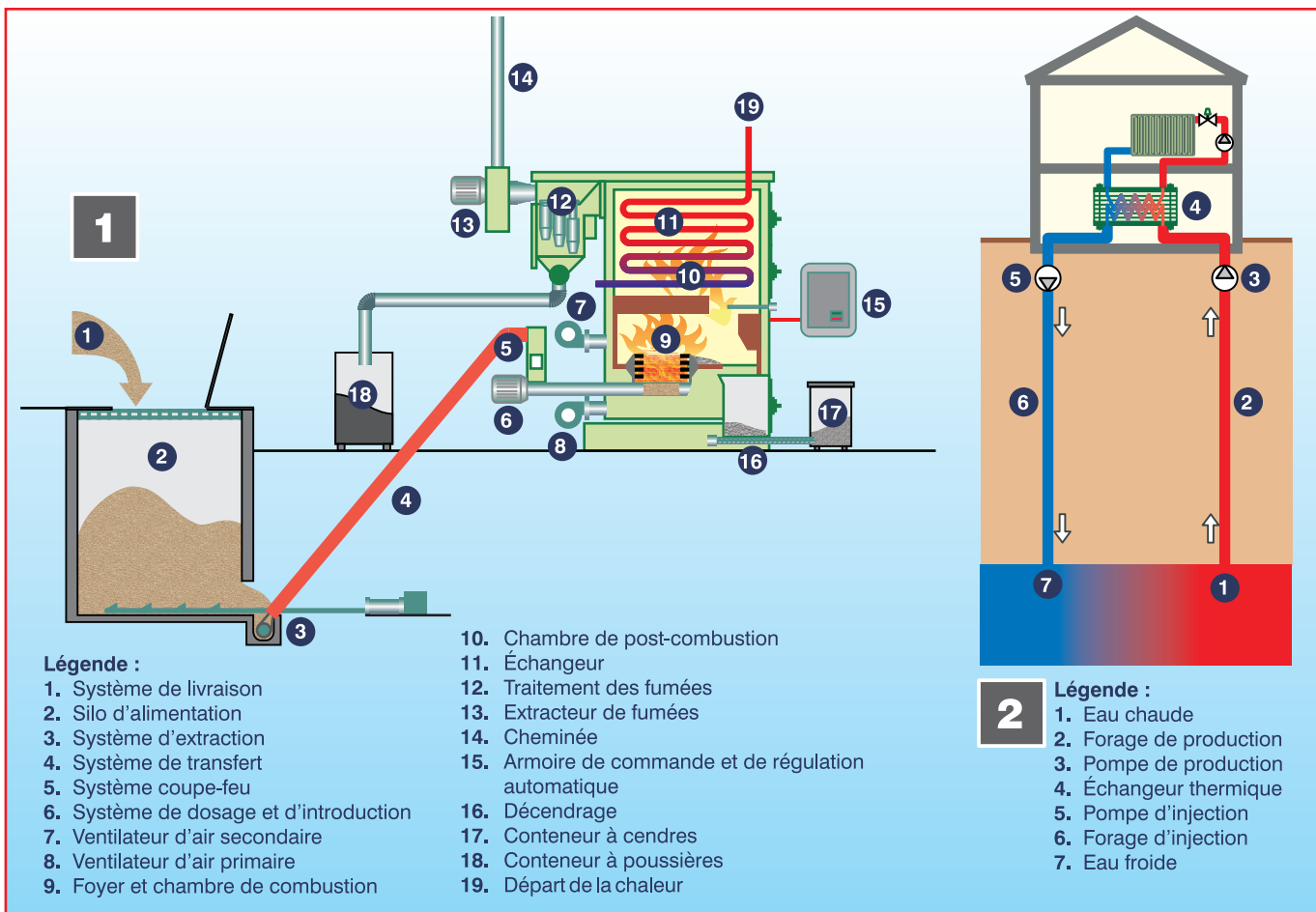
1 Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie : <http://www.ademe.fr/htdocs/bioenergies03.htm>

2 Cf. Observ'ER (Observatoire des énergies renouvelables) ; AMORCE (groupe de réseaux de chaleur).

À l'échelle urbaine, une collectivité peut faire des choix d'énergies renouvelables importants concernant la production de chaleur : c'est la première source de consommation énergétique en France.



L'utilisation actuelle des énergies renouvelables en France. **1**



2 Deux pistes à développer à l'échelle urbaine ou collective :
 1. Les chaudières collectives au bois (source : <http://www.itebe.org>).
 2. La géothermie (source : www.debat-energie.com).

L'urbanisation grandissante, l'augmentation de la population et l'amélioration du niveau de vie ont été au XX^e siècle les causes d'une consommation d'eau toujours plus importante. Dans les pays d'Europe, la consommation urbaine (qu'elle soit domestique ou industrielle, connectée au réseau de distribution public) de l'eau est aujourd'hui d'environ 100 m³, par personne et par année. En moyenne, 33 % de l'eau distribuée en Europe est utilisée par l'agriculture, 16 % par la consommation urbaine, 11 % par l'industrie (sauf le refroidissement) et 40 % pour la production d'énergie.

Comment une grande ville est-elle alimentée en eau ? Par captages d'eaux souterraines (sources, puits), tout d'abord. Ainsi, Paris possède, dans un rayon de 80 à 150 km, de nombreuses sources qui lui fournissent environ la moitié de l'eau potable nécessaire, amenée le plus souvent possible par la seule gravité ; en cas contraire, elles sont relevées par des usines de pompage. Ensuite, par le traitement des eaux superficielles (prélevées par exemple dans la Seine et la Marne) dans des usines de "potabilisation".

La qualité de l'eau dans la nappe phréatique influe beaucoup sur les coûts de fonctionnement de ces usines ; c'est une des applications importantes du principe de "pollueur-payeur" qui a déjà induit une réduction significative des rejets ponctuels d'effluents industriels mais aussi de nitrates et pesticides d'usage agricole, dans le réseau hydrographique. Par contre, il reste difficile de lutter contre les sources et les dépôts diffus de métaux lourds et de polluants organiques persistants.

On essaye également de rationaliser les besoins en eau potable. Ainsi, de plus en plus de villes possèdent une double distribution d'eau : le réseau d'eau potable d'un côté, et un réseau pour les utilisations qui n'ont pas besoin d'eau potable, par exemple le nettoyage des égouts, le lavage des rues ou l'arrosage des espaces verts, qui peut être alimenté par le pompage et le refoulement d'eau dans un fleuve.

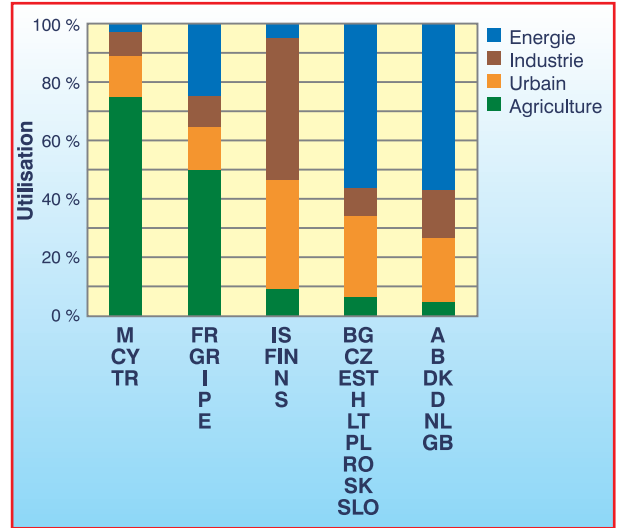
Un autre objectif visé notamment par l'OCDE¹ est l'amélioration de la gestion de l'eau, par un cadre intégré de mesures, une échelle cohérente de réflexion (les bassins versants), une réflexion sur les tarifs et l'accès à tous. C'est ce qui en France a été mis en œuvre dans la "loi sur l'eau" (1992), qui a consacré 4 grands principes : la vision d'une ressource unique qu'il faut gérer en conciliant intérêts économiques et équilibre écologique ; une gestion locale de la ressource, fortement décentralisée, avec par exemple la mise en place par les collectivités de périmètres de protection autour des points de prélèvements ; la lutte contre les pollutions et le gaspillage ; une plus grande transparence en matière d'information des élus et du public².

Enfin, il faut savoir que les pertes d'eau sur le circuit de distribution peuvent atteindre un pourcentage important du volume total, ce qui cause non seulement du gaspillage mais aussi des dommages sur la qualité de l'eau, car une trop faible pression dans le réseau peut provoquer une contamination de l'eau potable. La lutte contre les fuites est une action importante à l'échelle individuelle également, et peut représenter plus de 20 % de la consommation d'un foyer : entretenir sa robinetterie (un robinet qui fuit = plusieurs m³ par an) ; choisir des appareils plus économes (chasse d'eau, lave-vaisselle ou linge) ou encore, rationaliser l'arrosage du jardin (binages plus fréquents, profiter des pluies, arroser le soir, etc.).

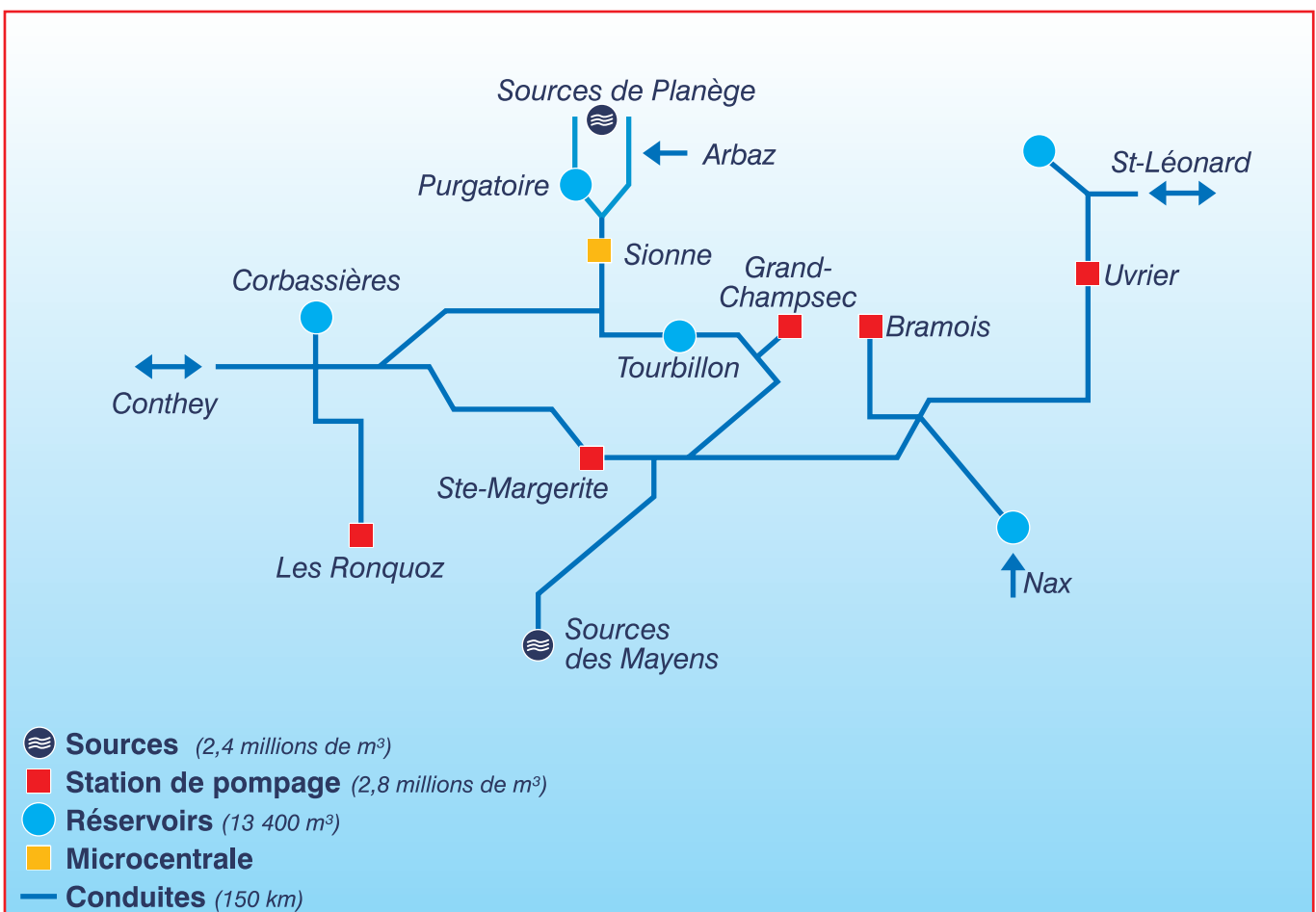
1 "Examen des performances environnementales dans les pays de l'OCDE : l'eau", sur le site <http://www.oecd.org/env/water.html>

2 http://www.environnement.gouv.fr/dossiers/eau/pages/politique/gouvernance/loi_eau.html

La qualité de l'eau distribuée en ville et son accès dépendent de celles du réseau et de la nappe phréatique qui l'alimente. Pour l'améliorer, on lutte contre la pollution dans l'environnement et on rationalise l'utilisation selon les besoins.



Utilisation de l'eau par secteurs en Europe **1**
(source : <http://themes.eea.eu.int>).



2 Le réseau d'alimentation en eau de la ville de Sion (Valais, Suisse) (source : <http://www.esr.ch/esr/>).

La pollution en milieu urbain est due aux gaz d'échappement des véhicules automobiles, aux activités industrielles, à certains combustibles, aux émissions de poussières et de divers pollens dans l'air ainsi qu'aux rejets d'eaux usées industrielles et domestiques dans les cours d'eau.

L'assainissement de l'air demande d'analyser sa qualité sur l'ensemble d'un territoire puis d'en réduire les sources de pollution. Parmi les polluants atmosphériques, six sont mesurés comme indices de l'évolution de la qualité de l'air : le dioxyde de soufre, par exemple, qui se forme lors du brûlage du mazout ou du charbon, constitue une des principales causes des pluies acides et provoque l'irritation des voies respiratoires. Les autres polluants mesurés sont les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, l'ozone dont la présence est souhaitable dans la stratosphère mais toxique dans l'air ambiant, le plomb, qui peut s'accumuler dans les tissus humains et le CO₂.

Pour l'eau également, la première étape est de faire l'inventaire des sources de pollution. À Montréal par exemple, plus de 4 500 établissements industriels et commerciaux génèrent des eaux usées et 1 200 d'entre eux déversent chacun, annuellement, plus de 9 000 mètres cubes d'eaux usées dans les égouts du territoire¹. Les eaux usées sont alors acheminées vers des stations d'épuration, où elles sont successivement dégrillées, dessablées et décantées à l'aide de produits chimiques. Les différentes étapes de ce processus permettent l'enlèvement de 80 % des matières en suspension, 75 % des phosphates et une réduction de 60 % de la demande biochimique en oxygène. L'eau est ensuite rejetée dans le réseau hydrographique.

La lutte contre ces rejets comprend des visites d'expertise, des tests d'échantillonnage mesurant les quantités de polluants rejetés dans l'air, la vérification de l'état de fonctionnement des dispositifs d'épuration et la recherche de toute nouvelle source de pollution demandant l'installation d'épurateurs ou de dispositifs de dépollution particuliers. Un projet expérimental européen utilise des plantes "sentinelles" pour détecter la pollution atmosphérique à Nancy : des "bio-indicateurs" (comme le tabac ou le peuplier) réagissent à l'ozone ou aux substances mutagènes contenues dans l'air : dégradation de la chlorophylle, altérations des chromosomes des cellules. D'autres plantes sont des "bioaccumulateurs" (le ray-grass ou le chou vert), dont la propriété est de retenir le soufre, les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques provenant de la combustion de l'essence, du fuel, du bois et du charbon.

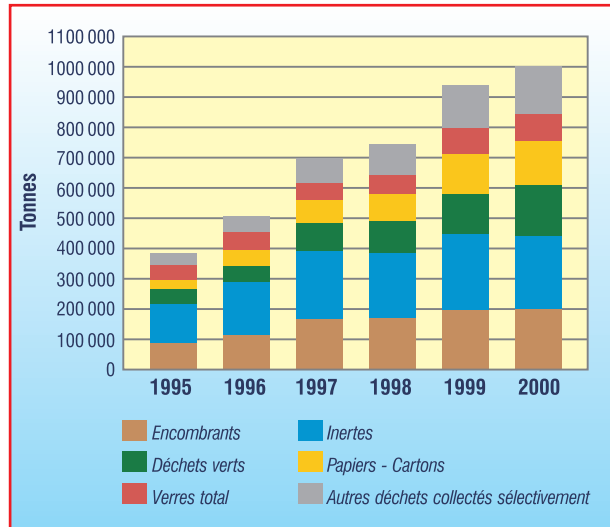
Enfin, pour réduire la quantité de déchets produits et donc le coût de leur traitement, les collectivités prennent aujourd'hui de nombreuses mesures pour optimiser la collecte, le tri et le recyclage des déchets, même s'il est encore trop courant actuellement de devoir "guérir" plutôt que prévenir² :

- la promotion du recours aux "écoproduits", produits recyclés et recyclables, qui limitent le suremballage, la production de déchets ;
- les démarches haute qualité environnementale des bâtiments (HQE), qui privilégient les matériaux valorisables et organisent le tri et la valorisation des déchets de chantiers ;
- la collecte sélective en habitat collectif et individuel, le tri et la collecte des déchets spécifiques (activités de soins, bâtiment, travaux publics) ;
- le compostage collectif et individuel et la méthanisation des biodéchets (déchets verts et fraction fermentescible des déchets ménagers).

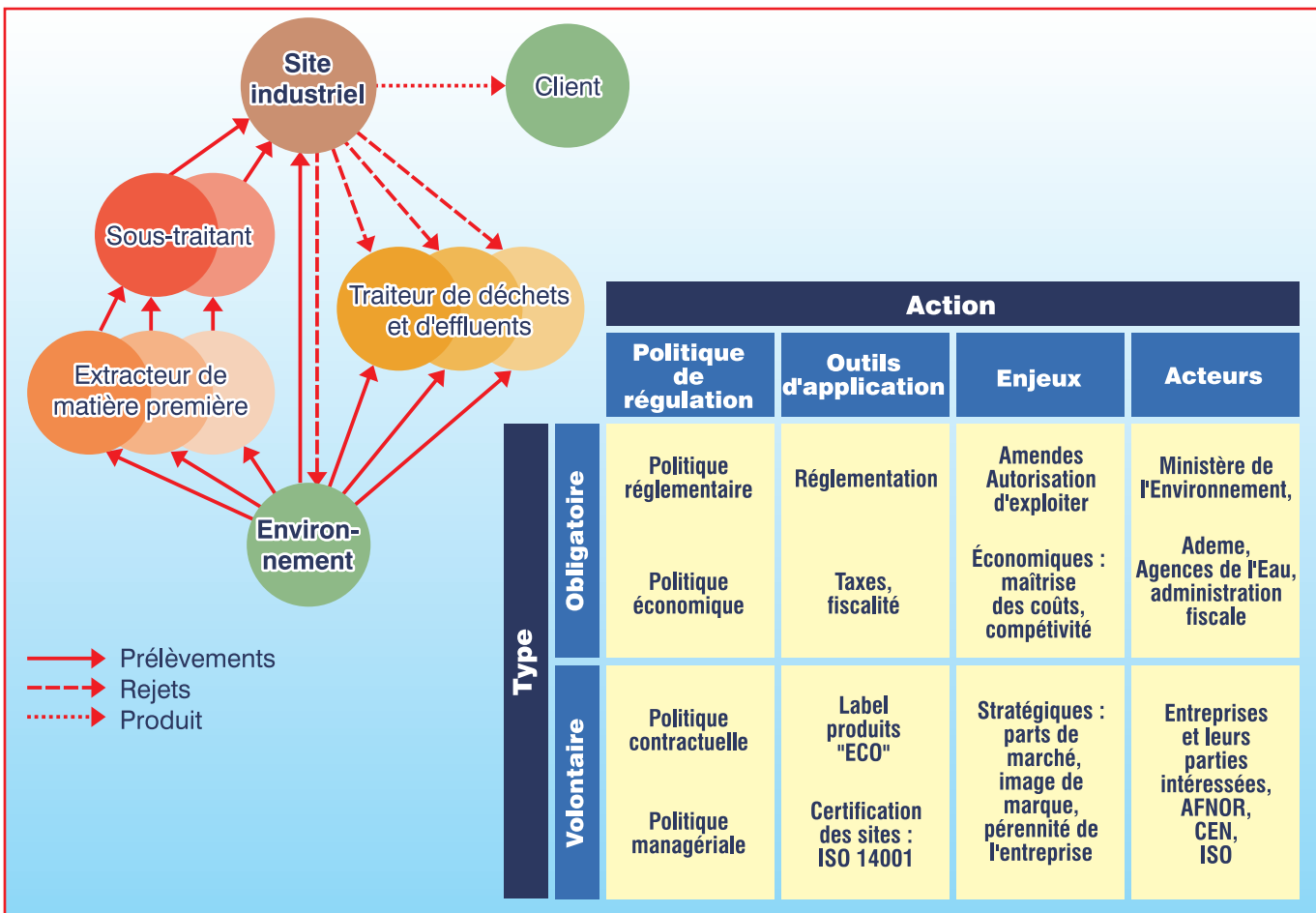
¹ Sur le site : <http://services.ville.montreal.qc.ca/air-eau/fr/brocairf.htm#78>

² Cf. "Territoires et développement durable", *Guide des collectivités territoriales pour la mise en œuvre d'un développement durable*, 2002, sur le site : www.comite21.org

L'assainissement de l'air comme de l'eau demande une surveillance étroite des sources de pollution, afin d'optimiser les dispositifs d'épuration. Toutefois, la démarche la plus efficace est d'agir à la source pour en diminuer les quantités.



Quantités totales de déchets collectés sélectivement dans la région wallonne (Belgique) (source : <http://environnement.wallonie.be>).



2 Schéma du système d'échanges entre l'industrie et l'environnement et type d'actions possibles de régulation des entreprises (source : www.agora21.org/entreprise/i223.htm).

Le développement durable cherche à intégrer d'autres critères que la rentabilité, d'autres fonctionnements que la loi de l'offre et la demande ; et à ne pas créer ses propres obstacles (épuisement des ressources, écarts sociaux inacceptables, appauvrissement culturel). Pour cela, il vise à l'équité inter-générationnelle (future) mais aussi intragénérationnelle : une plus juste répartition des richesses et des efforts entre le Nord et le Sud, au sein d'une société, entre territoires urbains ou dans un même quartier.

Des initiatives de plus en plus nombreuses sont prises pour rendre plus justes les échanges de biens : le commerce équitable cherche à garantir aux producteurs et à leur famille le pouvoir d'achat nécessaire pour subvenir à leurs besoins fondamentaux, de manière durable, en fonction du niveau de vie de la région concernée, ainsi que la stabilité d'emploi et de revenus. Il évite notamment les intermédiaires inutiles afin que le principal bénéficiaire du revenu soit le producteur. Il fait aussi pression pour que les conditions de travail dans les pays "du Sud" ne soient pas sacrifiées au profit de la rentabilité de quelques entreprises "du Nord" (cf. affiche OXFAM)¹. Les SEL (Systèmes d'échanges locaux) sont également une forme de solidarité innovante, basée sur le troc et l'échange de services entre citoyens.

Si des associations s'organisent au niveau international pour faire changer les conditions des marchés économiques (groupe de pression, de commerce, mais aussi sociétés bancaires), que des communautés d'habitants se créent pour vivre et consommer autrement (cf. le Cohousing), les communes et les pouvoirs locaux ont un rôle important à jouer pour la cohésion sociale et la lutte contre l'exclusion. Outre les politiques de solidarité sociale et d'insertion par l'emploi, il faut favoriser l'accès aux droits fondamentaux des plus démunis : l'alimentation, l'éducation, la santé, l'eau, l'énergie ; organiser la solidarité entre les territoires et la répartition des services (comme le maintien des bureaux de postes ou des arrêts de train dans les campagnes) ; prêter attention aux personnes à mobilité réduite dans les aménagements urbains et les transports.

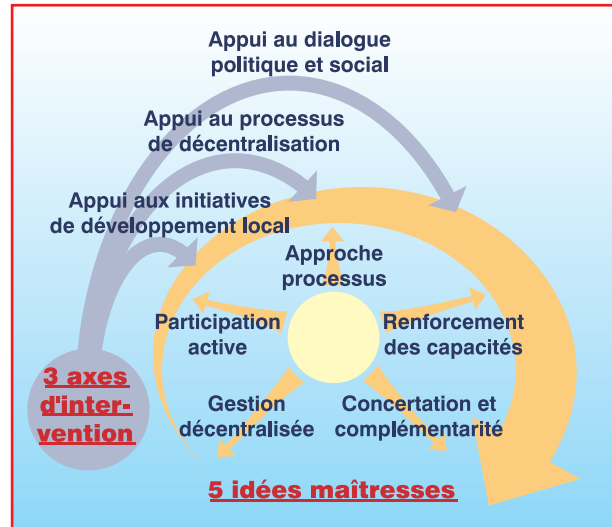
La reconnaissance et la valorisation des cultures des minorités présentes sur le territoire est un atout pour les sociétés : il faut prendre en compte cette solidarité dans la politique de recrutement ; veiller à produire une information accessible sur tous les dispositifs d'aide sociale existants et leur relais par les réseaux associatifs ; travailler à la requalification des quartiers défavorisés, avec l'appui des comités de quartiers ; organiser les aires équipées pour les gens du voyage ; favoriser la participation des populations d'origine étrangère aux instances de concertation, etc.

Dès l'après-guerre, une fédération s'était créée pour organiser le "jumelage des villes". Cette coopération décentralisée était déjà une école du développement durable, regroupant collectivités, citoyens, associations de développement, entreprises, proposant des passerelles "à l'échelle humaine" entre le local et le global, et une ouverture concrète des citoyens aux enjeux de la mondialisation. La demande dans le domaine de l'aménagement urbain est aujourd'hui croissante (infrastructures, eau et assainissement, énergie, transports, habitat) et les modes d'actions du développement durable y sont privilégiés : la conception, avec les acteurs territoriaux et associatifs locaux, de réponses sociales et techniques appropriées, dans le renforcement des capacités économiques et humaines locales².

¹ <http://www.madeindignity.be/public/01.htm> et <http://www.oxfam.org/fr/>

² <http://www.cites-unies-france.org/html/cooperation/index.html>

Pour soutenir d'autres critères de croissance que la simple rentabilité et agir pour le développement global de tous, de multiples initiatives voient le jour : marchés de commerce équitable, systèmes d'échanges locaux, actions locales de cohésion sociale...



La coopération décentralisée : les "cinq idées maîtresses" qui la différencie d'un processus d'aide classique (source : www.precod.com).



1



2

1. Affiche d'une campagne de sensibilisation aux conditions de travail dans la confection des vêtements de sport, à l'occasion des jeux olympiques d'Athènes (2004). 2. Principe de fonctionnement d'un Système d'échange local (SEL) (source : sel.lyon.rivegauche.free.fr).

Le troisième volet de la ville durable, après l'intégrité environnementale et l'équité économique, est la participation, expression récente du "droit des peuples à disposer d'eux-mêmes" (Déclaration des Droits de l'Homme), qui s'inscrit dans un mouvement général de décentralisation des décisions, de dé-légitimation des États-nations, et l'évolution vers des systèmes de gouvernance urbaine basés sur la prise en compte d'une multiplicité d'acteurs (cf. la notion "d'urbanisme faible").

La promotion de cette participation de tous à la prise de décision locale se base sur l'idée d'une "compatibilité naturelle" entre ce processus et les résultats espérés de la durabilité¹, d'abord parce que cette dernière nécessite l'implication responsable de tous, mais aussi car cette procédure réduit les futures oppositions potentielles et enfin, parce qu'elle est censée répondre aux aspirations de toute la collectivité.

Les outils prônés par le développement durable pour mettre en œuvre la démocratie locale sont les "Agendas 21 locaux". Cette démarche novatrice doit mobiliser toutes les "forces" de la communauté et s'inscrire dans une dynamique territoriale précise :

- l'Agenda 21 est conçu à partir des réalités et du contexte du territoire ; à chaque communauté locale de le concevoir "sur mesure", à partir de ses besoins et de ses objectifs ;
- il implique le décloisonnement des domaines de compétence des élus et des services techniques et amène la construction progressive d'une synergie et d'une optimisation des interventions et des investissements ;
- il doit dépasser les relations opposants/partisans ou élus/administrés, pour permettre à la collectivité locale d'animer un réseau d'acteurs, d'expertises et de savoirs diversifiés ;
- il contribue à la construction d'une culture du développement durable, tant chez les acteurs territoriaux que chez les citoyens, et crée les conditions d'un dialogue "nourri" entre décideurs et citoyens.

Il s'agit donc de définir et de mettre en place les moyens pour informer, consulter, mobiliser les habitants et les acteurs socioéconomiques, afin d'organiser la concertation de tous les citoyens. Souvent, la concertation est animée dans le cadre d'un Forum, représentatif de l'ensemble des composantes du territoire, qui lui-même anime et coordonne des "ateliers", groupes de travail thématiques plus restreints, composés à la fois d'"échantillons" de citoyens et de spécialistes. Chaque communauté conçoit son propre "mode de gouvernance" à partir de ses ressources locales, mais un certain nombre de démarches sont généralement nécessaires² :

- informer la population en préalable à la consultation et à la concertation : à quels enjeux répond l'Agenda 21 ? comment les citoyens y seront associés ?
- exprimer l'évolution des idées, à chaque étape, à partir des attentes, en évitant les "langages techniciens", en proposant des approches "par projets" ;
- veiller à la lisibilité et à l'accès par l'ensemble des populations concernées, des informations ou des propositions qui seront mises en débat.

Il est important cependant de souligner que ce nouveau processus de construction de la décision ne substitue pas sa légitimité à celle de la collectivité locale ou des élus : leur responsabilité dans les décisions concertées reste engagée.

1 Pierre Agha, "Du développement durable à la ville durable, le récit du passage", *Bulletin de la Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme (CPAU)*, nov. 2001, p. 29.

2 Cf. "Territoires et développement durable", *Guide des collectivités territoriales pour la mise en œuvre d'un développement durable*, 2002, sur le site : www.comite21.org.

La participation des citoyens à la prise de décision est un processus essentiel pour la construction de la "durabilité" locale ; elle s'incarne généralement dans la définition d'un Agenda 21 local.



Conférence lors de la semaine du développement durable à Marseille :
" Consommer autrement pour une Qualité de Vie Partagée®"

Publicité de la ville de Marseille pour "communiquer, informer, concerter"
(source : www.mairie-marseille.fr/vie/gouvern/gouver.htm).

1

Territoires et Développement durable	Groupes de travail	Thèmes abordés	Animateurs
	<p>Nature en ville</p> <p>Lutte contre les pollutions</p> <p>Aménagement de l'espace</p> <p>Vie quotidienne</p> <p>Sensibiliser, former et concerter les acteurs de la ville pour agir ensemble</p>	<p>Faune, flore</p> <p>Déplacements urbains, qualité de l'air</p> <p>Qualité urbaine</p> <p>Énergie, eau, déchets, bruit, risques urbains</p> <p>Sensibilisation, formation, concertation des habitants, des agents municipaux et des élus</p>	<p>Maison de la Nature et de l'Environnement - Naturalité</p> <p>Association "59, rue de l'Avenir"</p> <p>Atelier populaire d'urbanisme de Moulins</p> <p>Environnement et développement alternatif</p> <p>Groupement international des fermes d'animation pédagogiques</p>

1

2

2 1. Guides pour la mise en place d'un Agenda 21 local (source : www.comite21.org).
2. Les 5 groupes de travail mis en place dans le cadre de l'élaboration de l'Agenda 21 de Lille (juin 2000).

Cette opération est soutenue par le programme "Villa urbaine durable" du Plan urbanisme construction architecture (PUCA - Ministère de l'Équipement - France). Elle s'inscrit dans une politique locale visant à développer l'attractivité résidentielle de la ville-centre, pour contenir l'étalement urbain. Si beaucoup d'aspects environnementaux, urbains, économiques, et de mixité ont été pris en compte, le projet ne s'inscrit pas dans un processus de concertation ou un Agenda 21 défini ; il a fonctionné néanmoins avec une pluralité d'acteurs, du côté de la maîtrise d'ouvrage comme des architectes (proposant une réelle diversité de lieux), et en s'adjoignant un "observateur extérieur" chargé d'évaluer au fur et à mesure si les objectifs étaient atteints.

Le projet présenté ici est la première opération d'une ZAC (Zone d'aménagement concerté), pour laquelle la ville avait imposé 4 types de logements : un habitat "intermédiaire" locatif, avec accès indépendant et prolongement extérieur (jardin ou terrasse) ; un habitat individuel groupé, de type "maison de ville" ; des maisons à patio ; de petits collectifs sous forme de "maisons de parc". Cette diversité des logements, et l'alternative ouverte entre location ou vente, est un facteur de mixité des habitants ; en outre, les architectes ont étudié des logements évolutifs, deux aspects importants de la durabilité. Les maisons peuvent être transformées sans travaux de gros œuvre, par l'absence de porteurs internes (et l'utilisation du mitoyen), et offrent des espaces à usages variés, incluant la possibilité du télétravail.

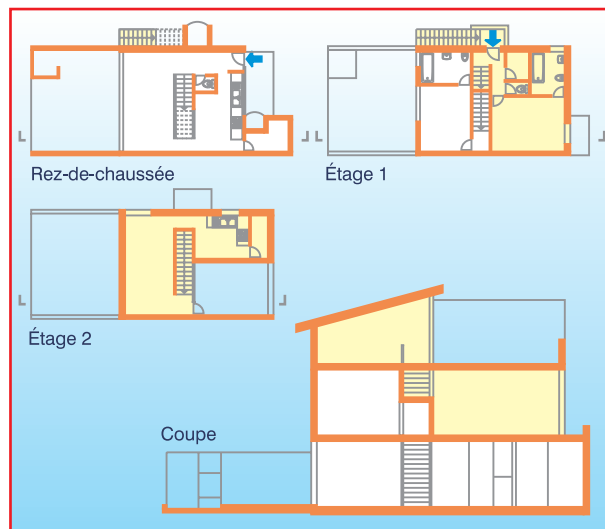
Le projet s'établit au cœur de 20 hectares d'anciens terrains maraîchers, et il profite des traces de parcelles, d'anciens murs et de puits. Divisé en deux, il propose au nord, un ensemble de jardins potagers, où sont également placés les parkings, les garages, et les espaces de jeux collectifs ; au sud, les habitations sont implantées sur une bande de terrain de 40 m de large, délimitées par deux murs qui sont la trace de l'ancienne utilisation du site. Par cette disposition, un maximum de porosité du sol a été maintenu, ce qui permet d'éviter les infrastructures lourdes d'évacuation des eaux pluviales.

Un dispositif collectif de captage d'eau était prévu, couplé à un réseau de "châteaux d'eau" – afin de fournir une eau "grise" pour l'arrosage collectif, les WC des logements et la réserve pompier. Disposés suivant une trame régulière nord-sud, ils donnaient "un repère cosmique" et une mesure du site, en offrant girouette, baromètre et cadran solaire au passant, et l'inscrivant ainsi tant dans le local que "le global". Cette idée n'a pas été acceptée par la société qui devait traiter ensuite les eaux rejetées, car elle se finance habituellement sur la vente de l'eau, ici obtenue gratuitement ; ce qui montre l'importance de gérer les services urbains directement par la commune, qui représente l'intérêt de la collectivité, et de séparer gestion et production.

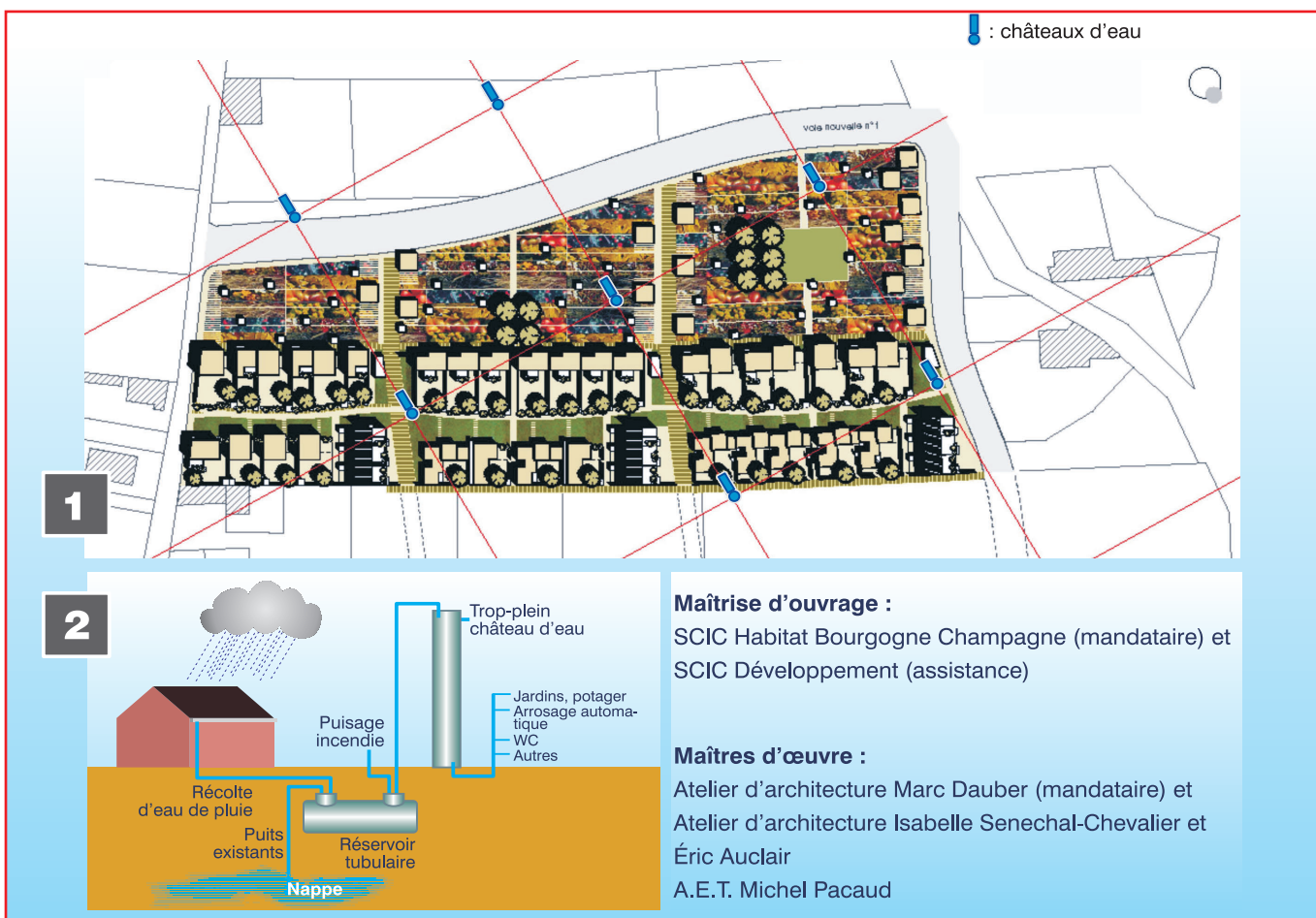
Les 14 cibles HQE ont été prises en compte, notamment dans les moyens de construction (utilisation de déchets de chantier recyclés) ; dans la gestion des déchets (tri sélectif pour les poubelles collectives ; placards extérieurs pour les poubelles des habitations ; compostage individuel dans les jardins potagers) ; dans la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire, semi-collective et solaire, avec une chaudière pour 4 ou 5 logements et une grande compacité du réseau primaire de distribution pour minimiser les pertes.

Enfin, les réseaux de déplacements doux sont différenciés de ceux à moteur, et raccordés au schéma directeur cyclable prévu par la ville. Les concepteurs ont fait le choix de proposer quelques stationnements communs, potagers et 30 garages individuels (pour 45 logements), volontairement séparés des maisons : le but annoncé est d'éviter le stationnement anarchique devant les habitations quand le garage accolé est annexé pour d'autres usages... un choix sans doute contraignant et un objectif à vérifier à moyen terme ?

Le nouveau quartier "St-Jean-des-Jardins" est un exemple intéressant d'urbanisme durable par la recherche d'une inscription dans le local et le global, la densité des logements dégagant une grande proportion de jardins pour le public, la gestion de l'eau, etc.



Type de logements intermédiaires, avec "emboîtement" - St-Jean-des-Jardins - Chalon-sur-Saône.



2 Plan masse figurant les implantations résidentielles, le réseau de châteaux d'eau (non réalisé) et les jardins potagers - St-Jean-des-Jardins - Chalon-sur-Saône.

Louvain-la-Neuve (Belgique) est une nouvelle ville fondée en 1972. Elle est issue de la scission linguistique de l'Université catholique de Louvain : à cause des conflits croissants dans les années 1960, la partie francophone déménage à 30 km au sud, au-delà de la frontière linguistique. Très tôt, le modèle du campus universitaire isolé, tel qu'on le connaît aux USA, est écarté. L'idée maîtresse de l'administrateur général (Michel Woitrin), est que l'université doit être implantée en milieu urbain, au sein d'activités et de populations diversifiées. C'est donc bien sur un projet de "ville nouvelle" que l'on planche, et on peut y trouver *a posteriori* certaines caractéristiques et exigences qui sont aujourd'hui celles du développement durable, même si l'époque est plutôt à l'écologie soixante-huitarde, voire encore à la planification totale des modernistes (cf. les villes nouvelles à la française).

À la base, en effet, on trouve des idées directrices de l'organisation de la ville très fortes, mais pas de plan d'aménagement figé au préalable, ce qui aujourd'hui est cité comme un exemple où "le projet prime sur le règlement"¹, où le plan d'urbanisme est graduellement construit, avec implication d'une pluralité d'acteurs, notamment un "conseil des résidents" très actif dès 1972. Ce lieu précurseur de "démocratie locale" est aussi le berceau d'associations comme "Habitat et Participation", qui favorise depuis 1982 les démarches participatives des habitants ; ainsi que de multiples formes "d'habitat alternatif", que ce soit dans les modes constructifs (habitat basé sur les matériaux recyclés ou récupérés) ou les modes de vie (communautaire, partageant un jardin, une salle de jeux, etc.).

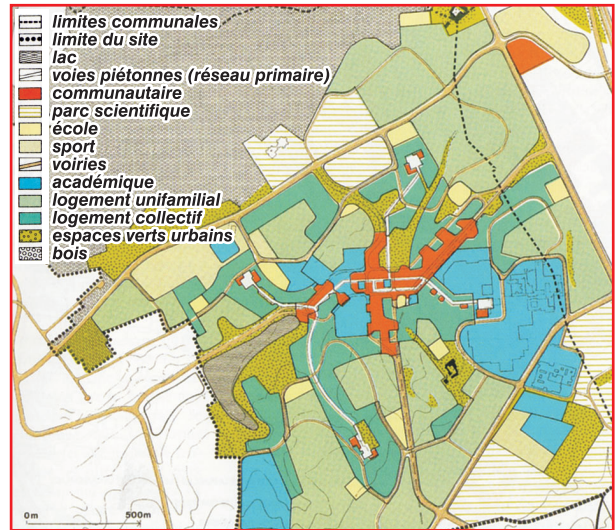
Mais la première idée était encore un principe "fonctionnaliste"² : la séparation des réseaux de circulations, schématisée par des chemins piétons qui rayonnent du centre vers les quartiers, et des routes automobiles en rocade extérieure, qui desservent la ville par quelques pénétrantes. La marche à pied reçoit donc déjà la primauté (pour des raisons ici de convivialité) d'où le besoin d'une compacité des formes urbaines et la définition d'un rayon maximum de l'urbanisation, équivalent à 15 min. à pied. Pour concilier cela avec "l'échelle humaine" voulue pour les gabarits, la mitoyenneté et un parcellaire serré se sont imposés, même dans les quartiers résidentiels. Ceux-ci sont implantés sur 4 collines, tandis que le centre urbain, dans la vallée qui les sépare, est construit sur une dalle qui rejoint le sol naturel, et il surmonte plusieurs étages de parkings et de routes rapides : les circulations sont à cet endroit superposées.

Exploiter et mettre en valeur la forme du site est donc aussi une idée directrice de départ, avec le leitmotiv de la "ville à la campagne", très diffusé : d'un côté, on préserve près du centre des zones de parcs, on crée un lac d'un bassin d'orage, on préserve les fermes (devenues centres culturels), on impose certains matériaux (brique et ardoise) ; de l'autre, on offre des équipements scolaires, culturels et sportifs qui sont à l'échelle de toute la région et font de Louvain-la-Neuve un pôle régional. Pour atteindre la mixité de population voulue, la création d'emploi est favorisée par l'implantation aux abords de la ville d'un "parc scientifique" destiné à des entreprises "non polluantes". La séparation des réseaux d'égouttage, le chauffage urbain des bâtiments universitaires, s'inscrivent aussi dans un souci de préserver l'environnement, sur lequel l'université, comme promoteur, garde la mainmise grâce à un système de baux emphytéotiques pour le foncier.

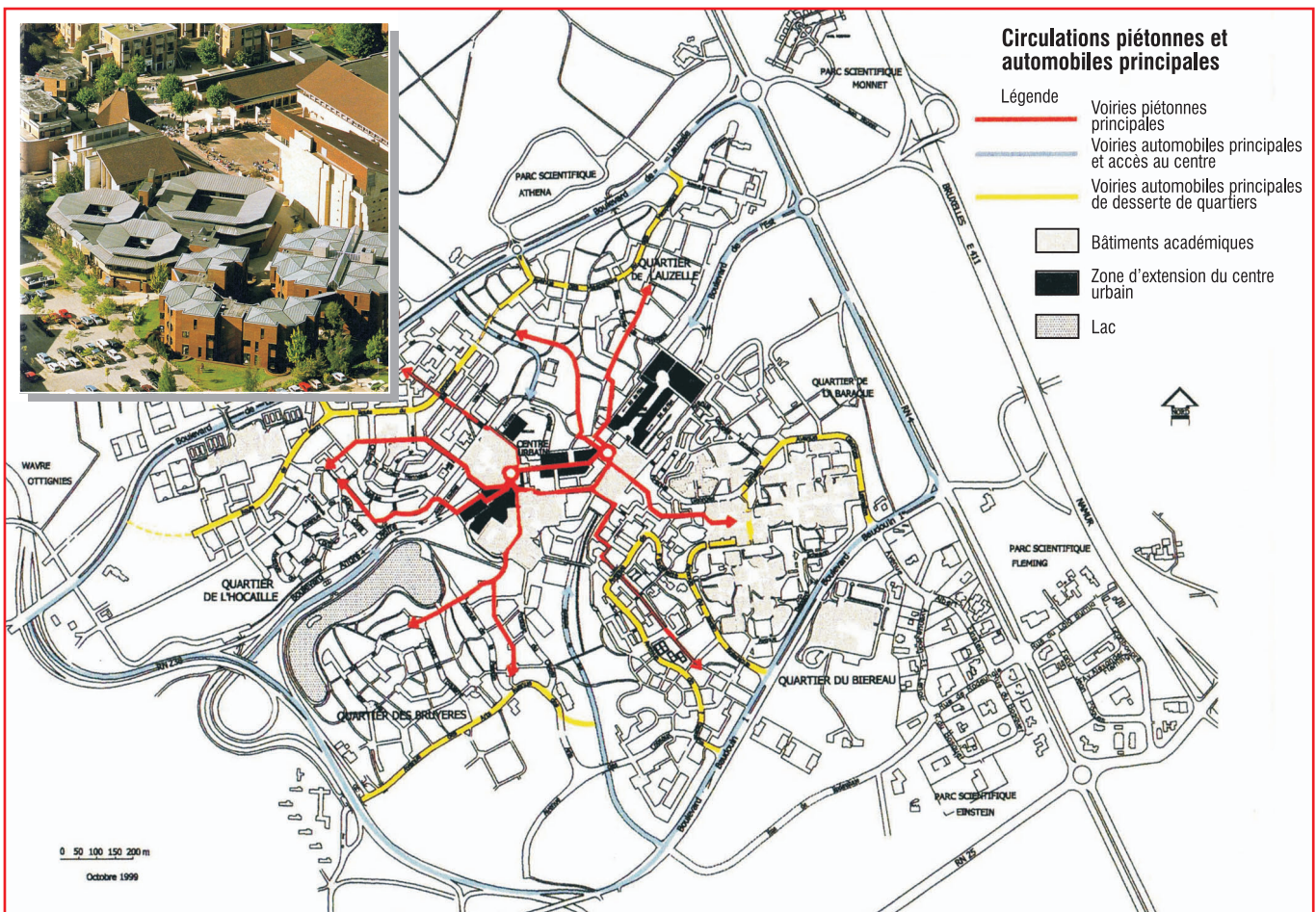
1 J. Rémy, D. Bodson, L. Boulet, "Louvain-la-Neuve, un cas de figure", *Les cahiers de l'urbanisme* n° 33, ministère de la région wallonne, mars 2001, p. 8 à 14.

2 Ch. Gilot, "Invention et tradition : Louvain-la-Neuve", *L'UCL, vie et mémoire d'une institution*, Bruxelles : La Renaissance du livre, 1993, p.13 à 25.

Louvain-la-Neuve est une ville universitaire fondée en Belgique en 1972, sur des principes fonctionnalistes mais aussi une volonté de mixité urbaine qui lui donne des caractéristiques qui sont aujourd'hui celles du développement durable.



1 "Schéma de principe de 1970" (source : UCL, Groupe urbanisme-architecture).



2 Plan actuel des réseaux de déplacements principaux (sources : UCL, administration des domaines) et la séparation des réseaux, à l'arrière et à l'avant des bâtiments académiques.

L'aménagement urbain intervient de plusieurs manières dans la réflexion sur l'environnement et le développement durable. Tout d'abord, il est partie intégrante de la conception de l'architecture bioclimatique. Que ce soit pour la "stratégie du chaud" (capter – stocker – distribuer – conserver la chaleur) ou celle du froid (contrôler le rayonnement solaire – évacuer la chaleur), il est important de prendre en compte l'échelle urbaine, ou l'échelle du site en général. On peut lister les données-types à prendre en compte dans la conception bioclimatique des espaces, intérieurs ou extérieurs :

- cartes hypsométrique et de topographie, orientation générale, hauteur des précipitations, moyennes des températures, diagrammes solaires suivant la latitude de la commune ;
- les indicateurs locaux : observation des vents, de la végétation, des cultures, du type d'implantation et de forme de l'habitat traditionnel et des bourgs anciens, la toponymie ;
- l'inventaire des obstructions à l'accès solaire : la hauteur des constructions avoisinantes et des arbres (à feuilles caduques ou non), le relief particulier tel que cuvettes ou poches à brouillard ; le relevé et le calcul des ombres aux périodes-clés de l'année (21 décembre, 21 juin, etc.) ;
- les facteurs potentiels d'économie d'énergie : des sources de géothermie possible, des protections végétales existantes, des lieux de canalisation des vents, les types de surface et la réflectivité des sols, etc.

Mais la ville doit également s'étudier en tant que microclimat spécifique : chaleur supplémentaire dégagée (bâtiments et transports), couche de pollution, vents dominants canalisés, etc. Ces microclimats locaux ont une influence prépondérante sur les usages des espaces et sur le comportement des gens : les activités extérieures possibles (station immobile en terrasse, dans un jardin public, une rue commerçante, une entrée d'immeuble) dépendent de la vitesse du vent à cet endroit, des heures d'ombrage, de la chaleur dégagée par le revêtement de sol, etc.

Troisièmement, le processus d'urbanisation a des conséquences sur l'environnement : des études¹ montrent comment à Brasilia l'expansion des villes satellites a provoqué la déforestation, l'érosion des sols et la pollution de l'eau. Le développement durable implique de rechercher une conception de la ville qui réduise les émissions de CO₂ (transports), les déperditions de chaleur, la consommation d'énergie, la production de déchets, etc.

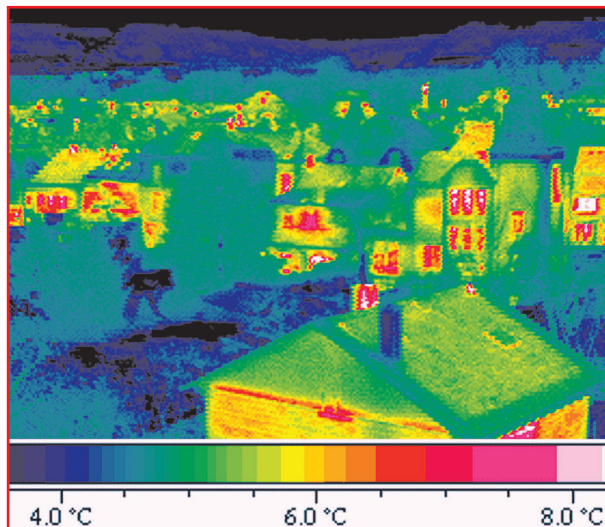
L'urbaniste devrait donc pouvoir agir sur les paramètres suivants :

- les formes urbaines : gabarits, orientation, étendue, enveloppe solaire, et la coupe des rues (rapport hauteur/largeur) ;
- les espaces publics : forme, matériaux, absorption/réflexion, ombrage ;
- la végétation et les pièces d'eau : pour permettre l'évapotranspiration des plantes et le processus de refroidissement de l'air par évaporation de l'eau ;
- la réduction du trafic, ou son détournement, pour réduire la pollution sonore, la pollution atmosphérique et les dégagements de chaleur.

Les outils d'évaluation, enfin, sont multiples : il y a d'un côté ceux qui mesurent les situations existantes, tels que les bilans d'ensoleillement (au sol, en façade) ou la thermographie (graphiques produits par une caméra à infra-rouge étalonnée) ; et de l'autre, des outils permettent de simuler numériquement des situations projetées, notamment les écoulements d'air.

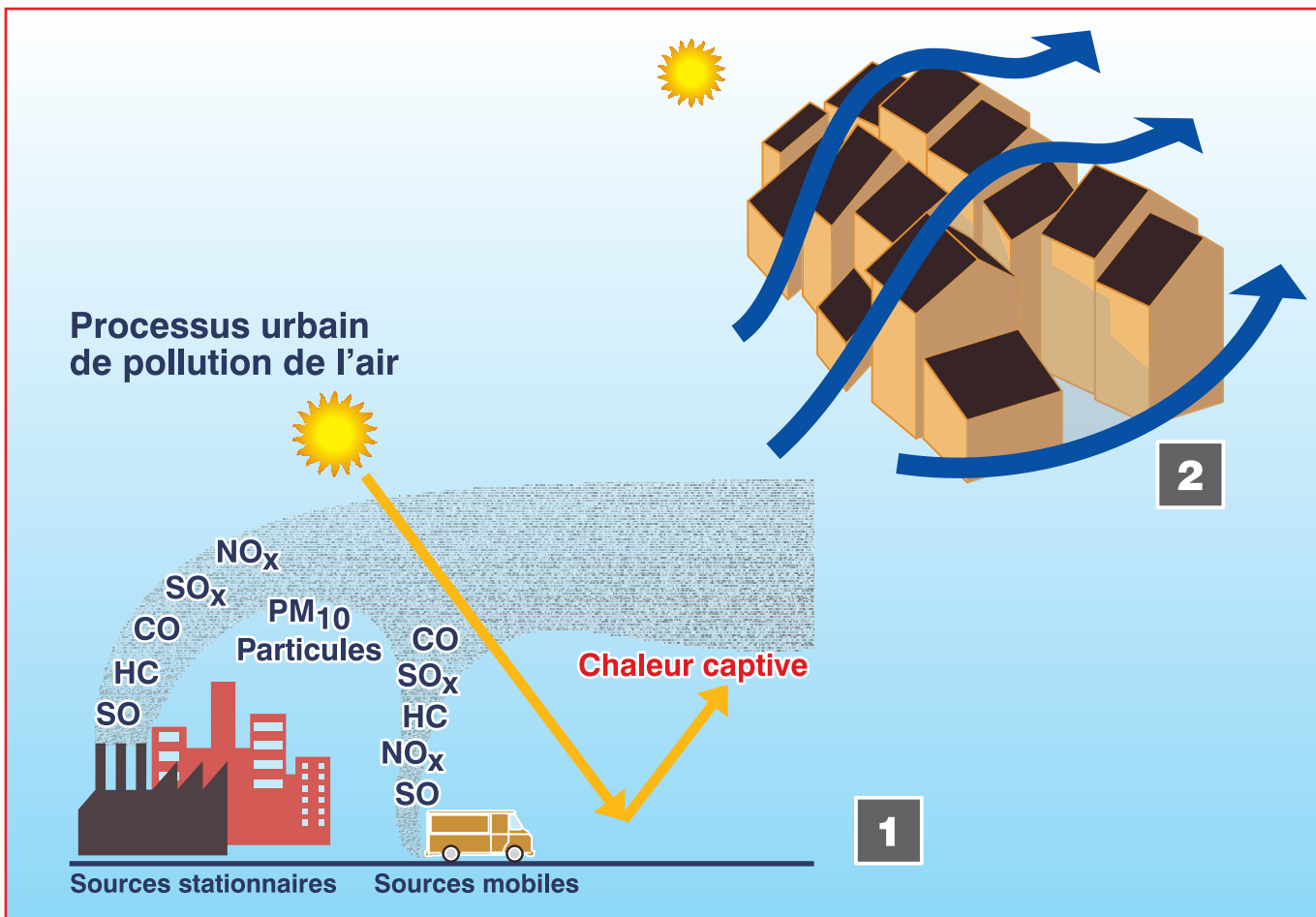
¹ Maria Adriana Bustos Roméro, "Bioclimatic performance of morphological parameters in the peripheral settlement in Brasilia", *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA '98 in Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998, p. 203 à 206.

La ville est un facteur important dans l'approche bioclimatique : ses caractéristiques influencent la conception des espaces architecturaux et elle constitue elle-même un microclimat particulier à analyser



La thermographie : un outil d'évaluation des caractéristiques thermiques d'un site (Diekirch de nuit, sur le site de Greenpeace Luxembourg).

1



2

1

- 2
1. L'urbanisation a des effets sur le climat.
 2. Le climat influence l'urbanisation : les rues resserrées préservent la chaleur en hiver et créent de l'ombre en climats chauds (d'après : Jean-Louis Izard).

Les données macroclimatiques fournies par les stations météorologiques décrivent une région en termes d'ensoleillement, de températures, de vents et de précipitations. On connaît en Europe, différents types de climats selon la proximité avec la mer : climats océanique (hivers plus doux et plus humides) ou continental (hivers plus secs, étés plus chauds). L'inclinaison et la course du soleil selon la latitude de la région ont déjà été abordées (tome 1). Les vents dominants également, caractérisent les climats européens :

- les vents du nord apportent un air froid et sec de l'Arctique ;
- les vents venant de l'ouest proviennent généralement du Gulf Stream. En hiver, ils amènent donc un air humide et relativement chaud, provoquant un temps doux, humide et nuageux. En été, ces vents sont toujours humides mais frais ;
- en hiver, les vents de l'est (sous influence des anticyclones de Sibérie) apportent un air froid mais sec, avec peu de nuages et donc un bon ensoleillement. En été, l'air continental venant de l'est est chaud et trouble, chargé de poussières réduisant d'autant le rayonnement solaire.

Les données du confort (température – vent – humidité) dépendent donc des conditions climatiques globales mais elles sont ensuite influencées par des facteurs locaux¹ comme la topographie, la végétation, ou la qualité de l'air. Ainsi, l'air trouble, chargé de poussières (tel qu'en milieu urbain) diminue l'ensoleillement direct mais augmente la radiation diffuse les jours nuageux ; la couche de pollution garde donc la chaleur "captive" au-dessus de la ville.

La topographie a une influence sur l'ensoleillement : des vallées orientées est-ouest risquent d'être ombragées en hiver sur la pente sud. L'orientation et la pente du terrain vers le soleil vont aussi influencer la température de l'air ; par contre, l'exposition aux vents dominants diminuera les différences de températures. La topographie peut aussi forcer les précipitations et les accumuler dans des poches humides, qui seront plus fraîches en été, tout comme les bords de lacs ou de mer, grâce à l'évaporation de l'eau qui extrait la chaleur de l'air.

Enfin, la topographie influence la force et la direction des vents : elle protège certains sites et en surexpose d'autres ; les vallées sont des couloirs prédominants ; la vitesse du vent augmente au sommet des collines ; les bords de lacs ou de mer provoquent des "brises thermiques" : la surface de l'eau est plus chaude que la terre en hiver, provoquant un mouvement d'air de la terre vers la mer, et vice versa en été. De même pour des terrains avec un relief important, l'air chaud en montant induira, dans la journée, des vents le long des pentes, qui peuvent être affectés par la structure du terrain. Une grande urbanisation provoque également ce phénomène, car la température en ville est souvent de quelques degrés supérieure à celle de la campagne environnante.

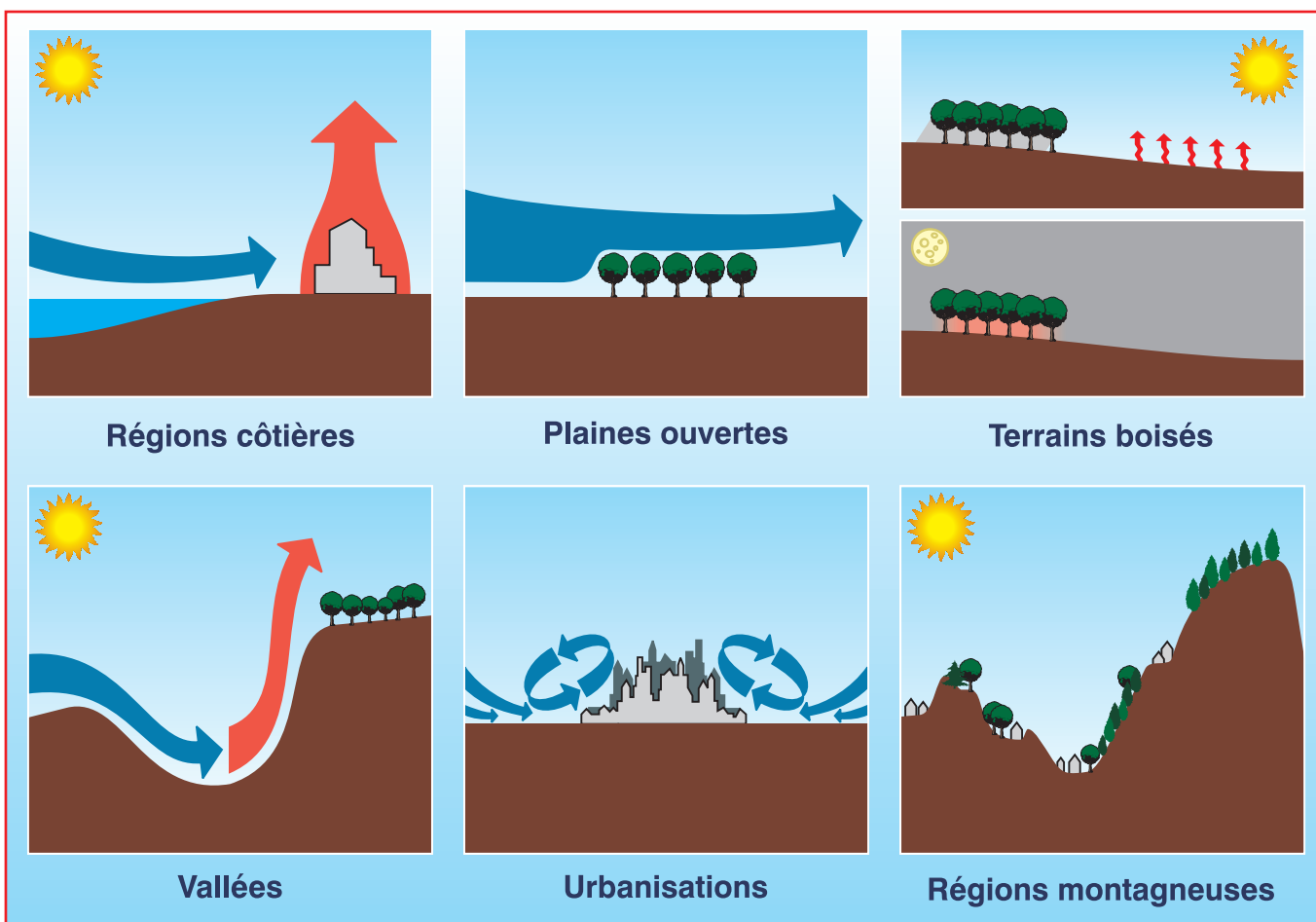
La présence de végétation joue également un rôle sur l'ensoleillement en tant qu'obstacle, qui peut être bénéfique en été et être sans effet en hiver, grâce à la chute des feuilles. Si elle est dense, elle peut aussi absorber une grande quantité de rayonnement solaire, rafraîchissant d'autant la surface au sol et réduisant la turbulence de l'air dans les couches inférieures ; la nuit, les feuillages diminuent le rayonnement du sol et donc la chute des températures. En été, l'air au niveau du sol est aussi refroidi par la perspiration de la végétation : en une semaine, 20 litres d'eau peuvent ainsi s'évaporer d'un mètre carré de gazon en Allemagne. Enfin, les feuilles des arbres agissent comme des filtres contre la pollution de l'air par particules solides.

¹ H. E. Landsberg, *The Urban Climate*, chap. 2 : "mesoclimate", Londres : Acad. Press, 1981.

Les conditions climatiques globales d'une région sont influencées par des facteurs locaux tels que la topographie, la végétation, la qualité de l'air : cet ensemble nommé "mezzo-climat", détermine la sensation de confort en milieu urbanisé.

	Vents	Températures
Régions côtières	forts, avec brise thermique	modulées par la présence de la masse d'eau
Plaines ouvertes	au-dessus de la norme régionale	proches de la moyenne macroclimatique
Terrains boisés	faibles, masses d'air stables	fraîches la journée, plus chaudes la nuit
Vallées	accélérés ou détournés selon l'orientation de la vallée	les faces du sud-est à sud-ouest sont plus exposées à la chaleur
Urbanisation	convection de l'extérieur vers le centre	plus chaudes sous une couche de pollution
Régions montagneuses	les pentes exposées aux vents reçoivent plus de précipitations	la température diminue de 0,7 degré pour 100 m de haut ; la pression diminue de 1 millibar par 15 m de haut

Les types de "mezzo-climats". 1



2 Les types de "mezzo-climats" (d'après H. E. Landsberg).

Il est intéressant d'observer la manière dont l'habitat traditionnel, l'architecture vernaculaire et les villages anciens sont organisés car leur mode de constitution, par répétition d'un savoir-faire dans le temps et les modifications apportées par chaque génération, leur confère en général une très bonne adaptation aux conditions locales, aux usages et aux nécessités de base : se protéger des vents dominants, capter le soleil en hiver, éviter les surchauffes d'été, stocker et restituer la chaleur. Les mots "d'urbanisme spontané" à ce sujet sont trompeurs, il est au contraire très lent et progressif.

En analysant l'implantation des fermes en climat tempéré¹, on remarque qu'elles disposent généralement des bâtiments d'exploitation, ou des espaces tampons (grange, cellier), à l'ouest, afin de protéger ce pignon des vents pluvieux, éviter les infiltrations, etc. Une forme en "L" plié à l'ouest protège des vents du nord (froid) et d'ouest (pluvieux) la cour, souvent orientée au sud. Enfin, plus la ferme est implantée haut sur la colline, plus elle est exposée aux vents et plus elle tournera le dos au nord et à l'ouest. Des haies vives ou des bois sont aussi fréquemment plantés pour atténuer l'impact du vent contre la construction. Les arbres dans les cours des fermes apportent ombre en été et maintiennent le vent au-dessus des constructions.

Les villages, ensuite, considérés comme des groupement de fermes, sont majoritairement implantés sur le versant nord des collines, afin de favoriser l'orientation principale, face au sud. Les rues orientées nord-sud, seront bordées par une succession de pignons de bâtiments, dont les façades principales seront ouvertes transversalement, vers le sud. Dans le cas d'une rue est-ouest, sa coupe est généralement asymétrique : les façades au nord sont alignées à la rue et profite de l'ensoleillement à l'arrière, les façades au sud prennent du recul par rapport à la rue. Les rues ont de nombreuses inflexions, qu'on perçoit aujourd'hui comme pittoresques, mais qui servaient à éviter que les rues ne se transforment en couloirs venteux.

Les bourgs ou villages plus importants, ont également une implantation générale qui cherche à se protéger par le relief des vents de l'ouest. Une plus grande densité et la mitoyenneté constituent une protection supplémentaire au vent et limitent les déperditions de chaleur. Les fonctions collectives comme un château, une église, sont en général à l'ouest du bourg, pour le protéger de leur masse, tandis que les places importantes de marché sont en aval du village (à l'est), abritées par les constructions et le couvert d'arbres.

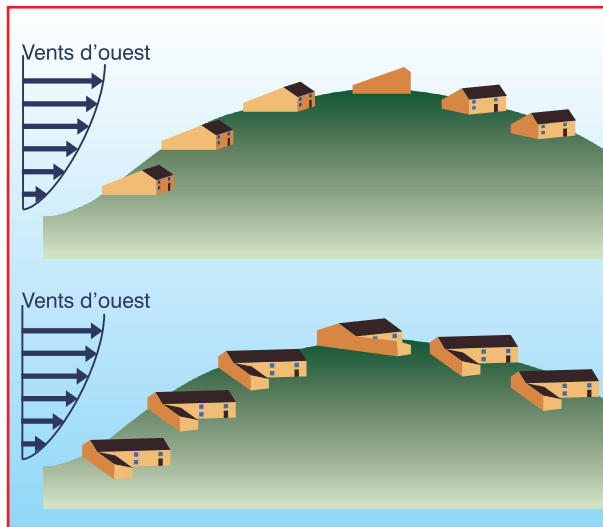
En climat méditerranéen, les villages traditionnels sont aussi urbanisés de manière dense, avec des maisons assez hautes, serrées sur la pente des collines au sud. Ainsi, les pièces d'en bas sont toujours à l'ombre grâce à l'étroitesse des rues, et elles restent fraîches en été ; c'est là aussi qu'en hiver, se trouve la source de chaleur tandis que les pièces du haut jouissent de l'ensoleillement grâce à la pente.

L'une des premières attitudes à avoir pour projeter de l'urbanisme climatique² est donc d'observer les implantations existantes mais aussi la toponymie (un lieu-dit "Bois du Moulin" sera venteux, la rue Pont-aux-Oies est humide) ou encore la végétation. Les arbres les plus bas et les plus effeuillés sont sous le vent, ils abritent les suivants ; la présence de végétation fragile, signale une zone d'abri. Même en ville, les usages de locataires sont révélateurs des conditions locales : fermetures de balcons en loggias vitrées ; volet ou tente déroulante surajoutée à la façade d'un immeuble, etc.

¹ *Décider avec le climat*, conseil général des Deux-Sèvres.

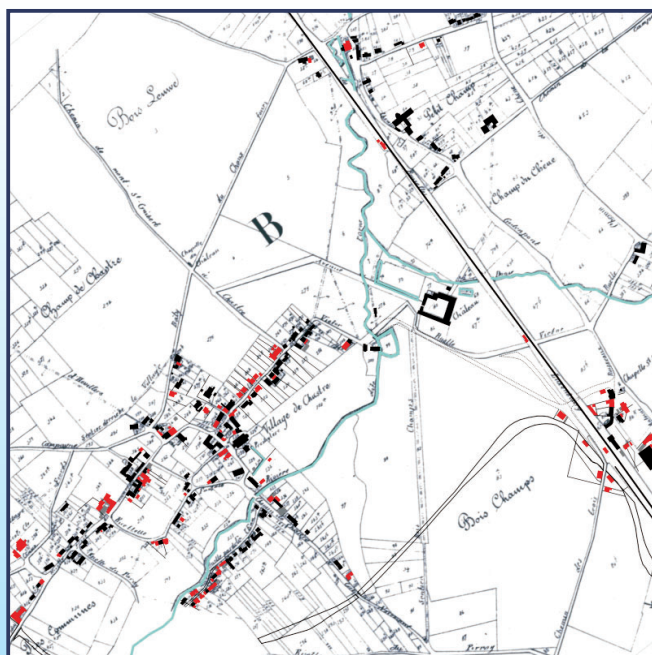
² Jean-Louis Izard, Alain Guyot, *Archi bio*, Éd. Parenthèses, 1979.

L'habitat traditionnel, l'architecture vernaculaire et les villages anciens se sont constitués par amélioration progressive d'un savoir-faire dans le temps, ce qui leur confère une très bonne adaptation aux conditions et aux usages locaux.

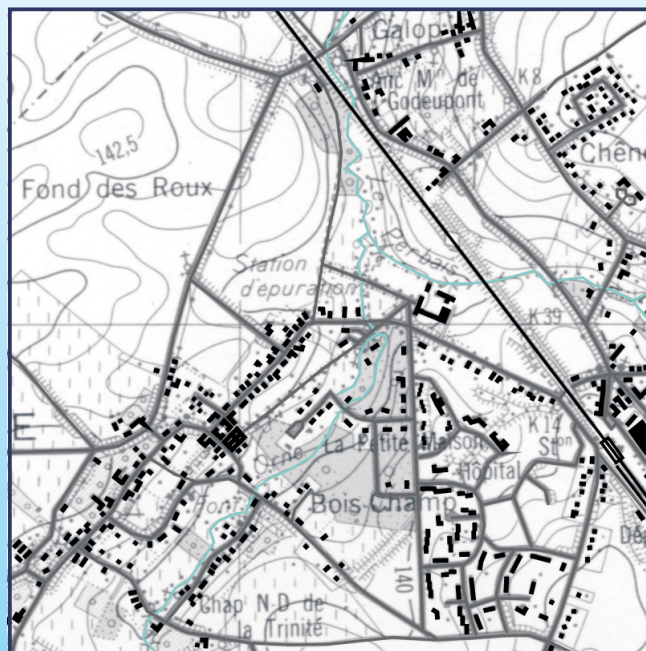


Orientation traditionnelle des fermes monoblocs ou en "L", suivant leur position dans la topographie (source : conseil général des Deux-Sèvres).

1



En 1914



En 1994

2 Le village ancien de Chastre (Brabant, Belgique) est implanté sur le flanc de colline orienté vers le sud-est, parallèlement à la pente et en contrebas de la crête. L'urbanisation du XX^e siècle s'est construite sur les flancs orientés à l'ouest et sans relation à la topographie (d'après B. Grosjean).

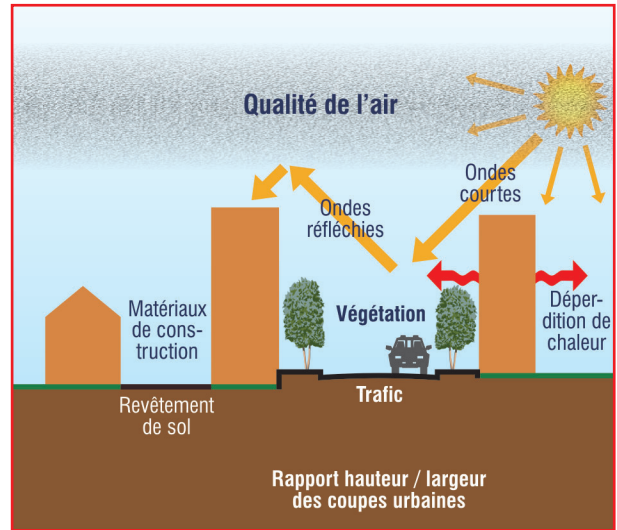
La principale caractéristique bioclimatique des milieux urbains est la différence entre leur température moyenne et celle des espaces ouverts ou moins construits environnants. On a remarqué en général que cet effet de "heat island" (île de chaleur) était plus important dans les villes américaines que dans celles européennes, ce qui serait dû à des bâtiments plus hauts et à des profils de rue plus étroits. Les principaux facteurs qui sont en cause¹ :

- 1) La pollution de l'air : elle réduit les capacités de transmission de l'atmosphère urbaine. Une partie du rayonnement solaire dirigé vers la ville est retenue par la couche de pollution qui la recouvre ; l'autre partie du rayonnement direct qui y pénètre devient diffus. En conséquence, les taux d'ensoleillement en ville peuvent être gravement inférieurs à ceux de la campagne, ce qui fut le cas à Londres : en 1956, on a instauré le "Clean Air Act" qui a permis de retrouver en 10 ans un taux d'ensoleillement hivernal dont la valeur était tombée à 50 % de celui des environs.
- 2) Les formes construites. En ville, la proportion de surface exposée par m² de terrain est plus grande : la capacité d'absorber les radiations solaires est donc supérieure, surtout en hiver. Cependant, cette même densité bâtie réduit les possibilités d'ensoleillement d'un site (le "ciel visible"). Cette part plus grande d'ombrage, qui peut être très importante en hiver, est aussi dommageable en été pour le refroidissement de l'air : celui-ci est obtenu par le renvoi des radiations à longues ondes vers l'atmosphère, il est donc rendu plus difficile par des coupes de rues étroites, et par la couche de pollution qui bloque la dissipation de chaleur.
- 3) Les types de matériaux et de surfaces utilisés. La capacité d'absorption thermique des matériaux de construction est importante car elle régule la fluctuation des températures, en absorbant la chaleur durant la journée et en la ré-émettant la nuit : les variations jour/nuit en zone rurale sont plus importantes. La capacité de réflexion des surfaces est donc aussi un facteur important : elle détermine l'augmentation de température de la surface, et donc celle des couches d'air adjacentes. Les couleurs sombres de l'asphalte, du béton et de la brique créent ainsi des surchauffes localisées.
- 4) La production de chaleur par les bâtiments et par le trafic : la consommation d'énergie en milieu urbain, pour l'éclairage, le transport, ou le chauffage des bâtiments, ainsi que leur mauvaise isolation thermique, et même le métabolisme de l'activité humaine, produisent une chaleur qui peut être équivalente en hiver à celle apportée par le rayonnement solaire.
- 5) La moindre circulation de l'air et les taux d'humidité réduits. La vitesse du vent est généralement moindre (sauf cas particuliers, cf. p.359) en milieu urbain dense qu'en rase campagne, ce qui défavorise l'évaporation et le refroidissement de l'air. De même, la trop grande rareté de la végétation en ville ne lui permet pas d'y maintenir un taux d'humidité agréable.

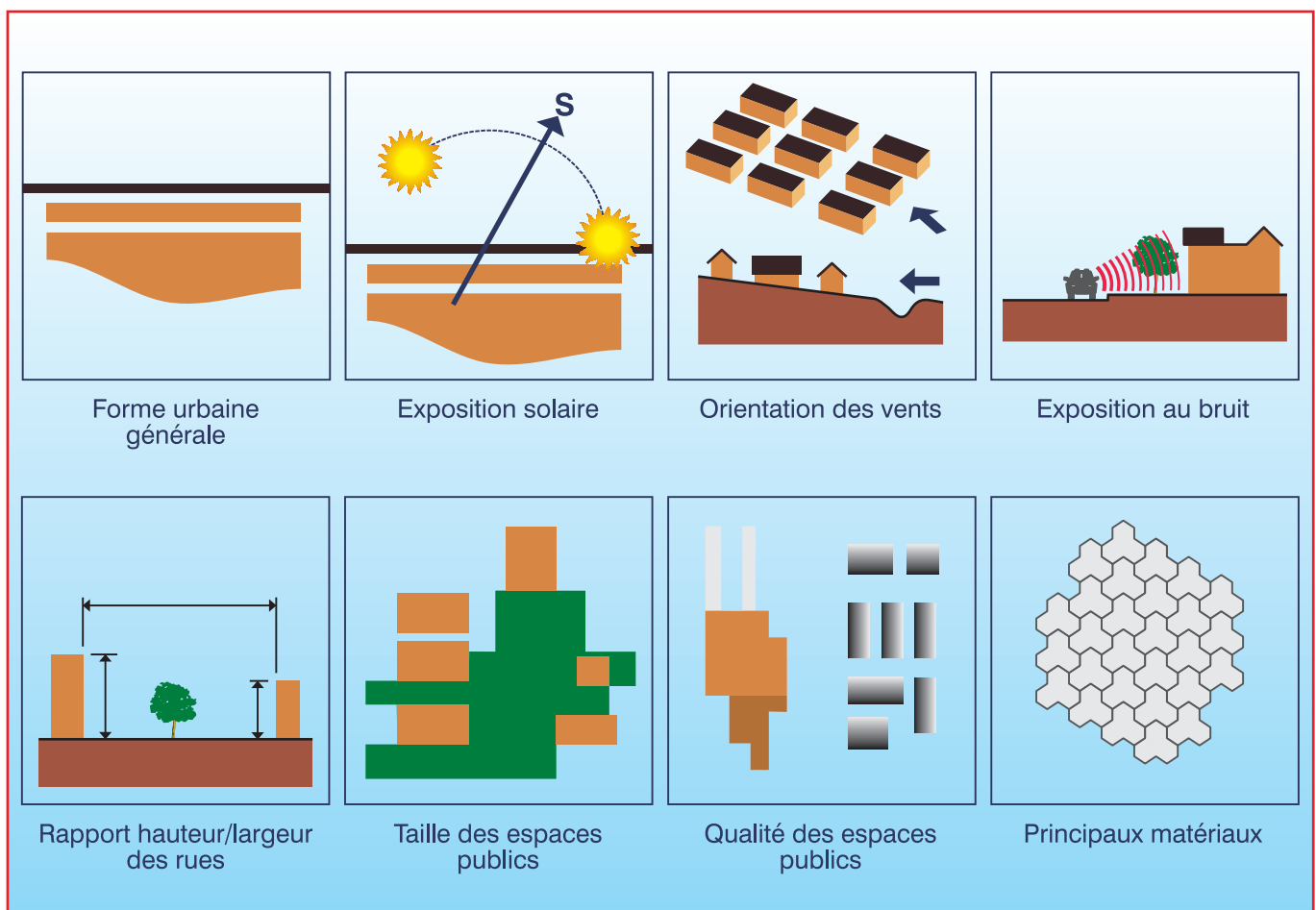
Par conséquent, la température, l'humidité, la vitesse du vent, les taux de radiation solaire mesurés aux alentours de la ville (souvent au droit des aéroports) peuvent être très éloignés de la réalité rencontrée par le concepteur en milieu urbain ; des changements climatiques drastiques peuvent aussi y être observés en très peu d'années. Enfin, un même tissu urbain n'est pas du tout homogène : les variations peuvent être importantes d'une rue à l'autre selon leur coupe, leur matériaux, leur orientation.

¹ Simos Yannas, "Living with the city : urban design and environmental sustainability", *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA '98 in Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998, p. 41 à 48.

Le milieu urbain se caractérise par des gradients de température importants par rapport aux espaces ouverts environnants. Les paramètres de ce phénomène sont la pollution de l'air, les formes construites, les matériaux utilisés, la chaleur dégagée par les bâtiments et le trafic, les taux de ventilation et d'humidité.



Les paramètres influençant la température urbaine. **1**



2 Facteurs influençant les performances bioclimatiques d'un site (d'après Bustos Romero Marta Adriana).

Différents éléments influencent l'écoulement du vent au niveau microclimatique : la localisation, la rugosité du terrain, la hauteur d'évaluation, la topographie et l'aménagement du site (bâtiments, arbres...). Les villes constituent des surfaces de forte rugosité, ce qui réduit globalement la vitesse du vent et augmente sa turbulence.

Pour le confort des piétons, les vitesses de vent devraient être inférieures ou égales à 5 m/s dans les espaces publics. Les tissus denses de hauteur homogène relativement faible, tels que les centres des villes traditionnelles, assurent globalement un excellent confort au vent. Les quelques accidents aérodynamiques à craindre se situent à la périphérie et dans les zones très dégagées. Cependant, les villes contemporaines présentent des constructions très élevées qui entraînent des rafales de vent inacceptables pour le confort des piétons. Il est indispensable d'étudier l'impact du vent au niveau du sol pour les bâtiments dont la hauteur est supérieure ou égale à 40 m mais il est prudent d'étudier cet aspect dès qu'un bâtiment de 15 à 40 m de haut présente une hauteur au moins égale au double de la hauteur moyenne de son environnement bâti.

Les principaux mécanismes critiques du vent sont représentés sur la figure 2. En milieu urbain, ces effets apparaissent à la base des bâtiments dont la hauteur est nettement plus élevée que le plan masse moyen et au pied des ensembles de tours. Les dispositifs de correction (brise-vents...) sont toujours moins efficaces qu'une conception appropriée du bâtiment. Voici quelques règles de bonne pratique qui permettent d'atténuer ces risques :

- réduire la hauteur du bâtiment, ce qui est toujours la meilleure solution ;
- créer des décrochements progressifs à partir du cinquième étage ;
- augmenter la porosité du bâtiment ;
- ceinturer le bâtiment élevé par des constructions plus basses ;
- densifier l'environnement ;
- prévoir des éléments poreux (végétation...) près des coins ou des passages sous le bâtiment ;
- augmenter la rugosité des façades par des balcons (>1.5 m de large).

Les rues de nos urbanisations sont polluées au niveau du sol par les véhicules à moteur et à hauteur des toits par les cheminées. Pour assurer le confort respiratoire dans les rues, il est important de profiter de la capacité du vent à disperser les polluants, ce qui nécessite une vitesse de vent d'au moins 2 m/s au niveau des toits. Il faut également dimensionner des hauteurs de cheminées suffisamment hautes pour que le vent ne redirige pas la pollution générée en toiture vers le sol. Au niveau de la planification urbaine, les industries polluantes seront placées sous le vent de la ville par rapport aux vents dominants.

Pour assurer le confort thermique des piétons et limiter les consommations d'énergie des bâtiments, il est nécessaire de protéger les espaces publics des vents froids et dominants, tout en favorisant la pénétration des brises estivales.

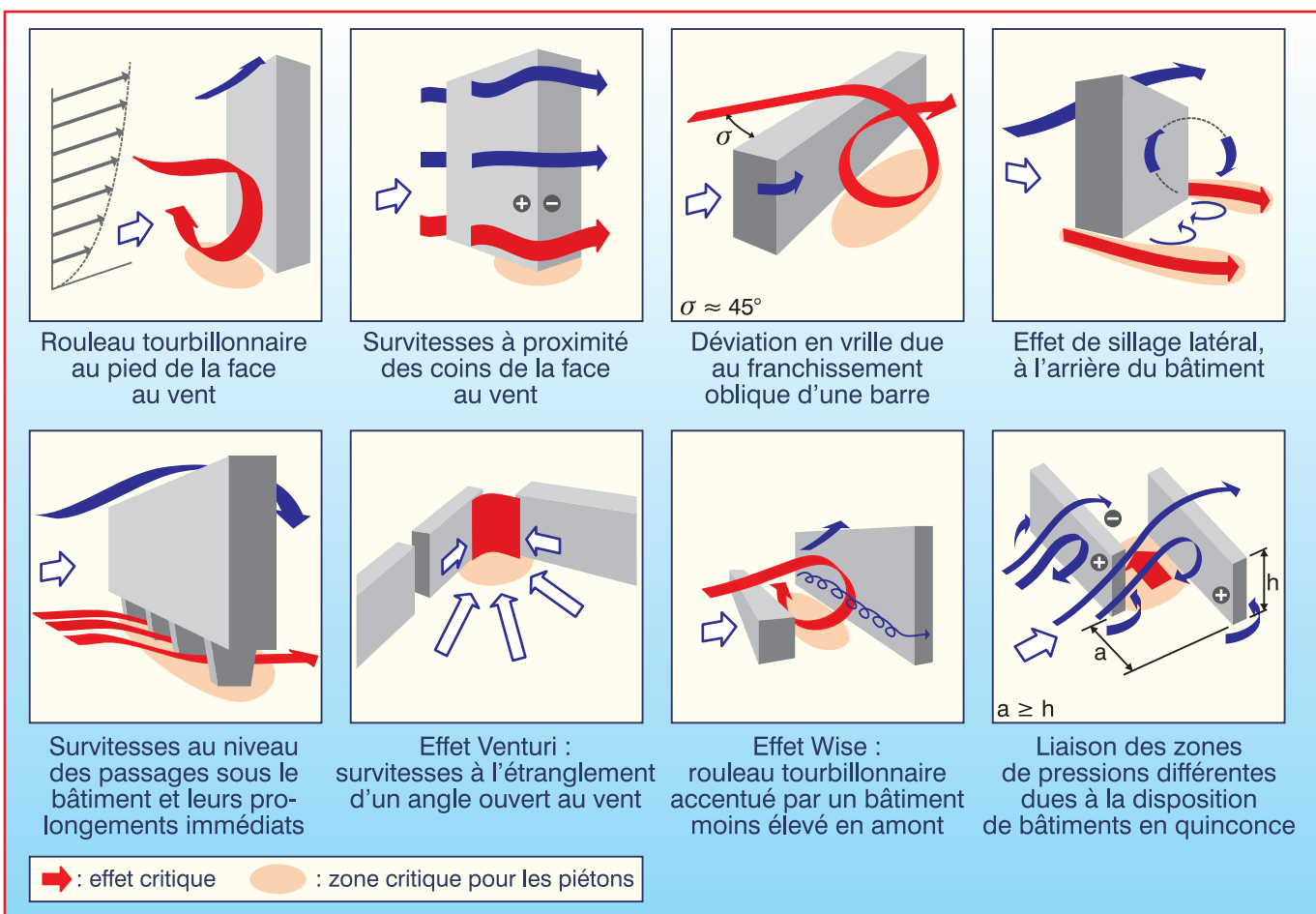
Ainsi, quatre règles doivent être respectées pour concevoir une morphologie urbaine qui bénéficie des aspects positifs du vent et se protège de ses effets négatifs :

- éviter les survitesses et les turbulences gênantes pour les piétons ;
- assurer la ventilation des espaces publics pour dissiper la pollution ;
- protéger les espaces publics des vents froids et dominants ;
- favoriser la ventilation naturelle des bâtiments grâce aux brises d'été.

Le vent est un élément fondamental dans la conception d'un microclimat urbain de qualité. Il influence le confort des piétons, la dispersion des polluants et la consommation d'énergie des bâtiments.



Le vent en milieu urbain. 1



2 Les principaux mécanismes critiques de l'écoulement du vent.

Pour tout travail d'urbanisme climatique, l'analyse du site est la première étape, sur base des informations rassemblées : données climatiques générales de la commune ; indicateurs locaux ; inventaire des obstructions à l'accès solaire et des facteurs d'économie d'énergie.

1) Le choix du site : on tire de l'ensemble de ces données un classement du site en zones soit très favorables, qui peuvent être privilégiées dans le développement à court terme ; d'autres nécessitant des aménagements préalables (plantation de haies, de bois) ; d'autres enfin devant être considérées comme non constructibles. On peut également juger nécessaire de classer certaines parties boisées ayant un rôle climatique reconnu. Précisons qu'il est ici implicite de connaître également les réglementations locales, les sites historiques, les gabarits et toitures, les fonctions, les configurations et les matériaux imposés. On en déduit enfin une orientation préférentielle de l'urbanisation, confortée par l'orientation des villages traditionnels proches, et nuancée par sa position dans le relief.

2) La disposition des rues et des parcelles : le maillage de rues dépend avant tout du réseau existant et des hiérarchies urbaines (axes principaux, type d'îlots) puis des logiques du relief (pour minimiser les coûts de nivellement, éviter les problèmes d'érosion et d'éboulement) et des lieux à desservir. Ensuite, on peut rechercher la disposition qui autorise le maximum d'orientations préférentielles des parcelles.

À ce stade, rues et parcelles sont conçus ensemble, voire même avec le gabarit du bâti (ils forment le "tissu urbain"). En effet, même dans un lotissement simple, ces paramètres sont imbriqués :

- les rues orientées nord/sud demandent des parcelles assez larges, pour éviter que les constructions ne se fassent successivement de l'ombre ;
- les rues est/ouest imposent aux maisons desservies par le sud d'avoir un grand recul à rue, pour profiter d'un jardin bien orienté à l'avant ;
- des rues orientées sud-est/nord-ouest (ou perpendiculairement) doivent éviter les parcelles allongées sud-ouest/nord-est car elles vont recevoir les vents dominants sur les deux façades principales, etc¹.

La largeur des rues est un paramètre important du confort extérieur, à calculer ensuite, selon les schémas d'ombrage maximal accepté en hiver, ou minimal en été (climats chauds). Il est préférable d'utiliser les routes pour créer le recul solaire, afin de ne pas y affecter des terrains constructibles.

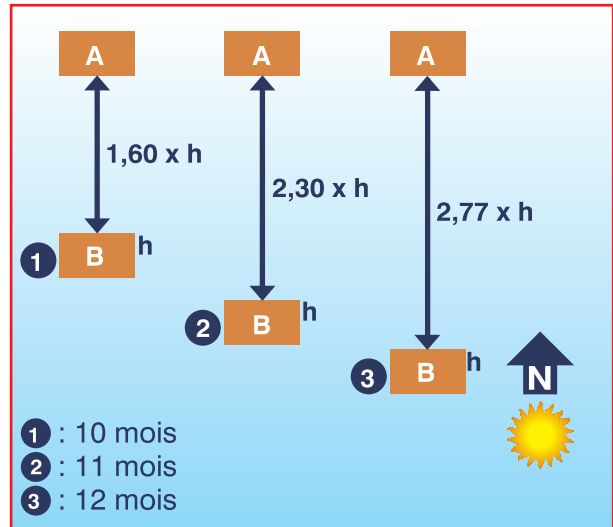
3) Les gabarits : on cherchera à placer les volumes les plus hauts du côté nord de la rue et les plus bas du côté sud pour contribuer à réduire l'ombrage de la rue, ou vice versa, pour ensoleiller plutôt les parcelles. Une règle simple (schéma 1) permet d'évaluer (sous nos latitudes tempérées) les distances entre bâtiments à respecter suivant le nombre de mois d'ensoleillement souhaité. Un calcul plus sophistiqué consiste à construire "l'enveloppe solaire" de la parcelle (schéma 2) : il s'agit du volume maximum qu'un bâtiment peut occuper sur un site sans causer d'ombrage significatif². L'exemple illustré est celui d'une parcelle à 40° de latitude nord, qui garantira l'accès solaire aux sites voisins entre 9 et 15 h, même le 21 décembre.

On peut enfin instaurer des accès par le nord/ouest de la parcelle, afin de favoriser la conception des espaces tampons dans cette orientation.

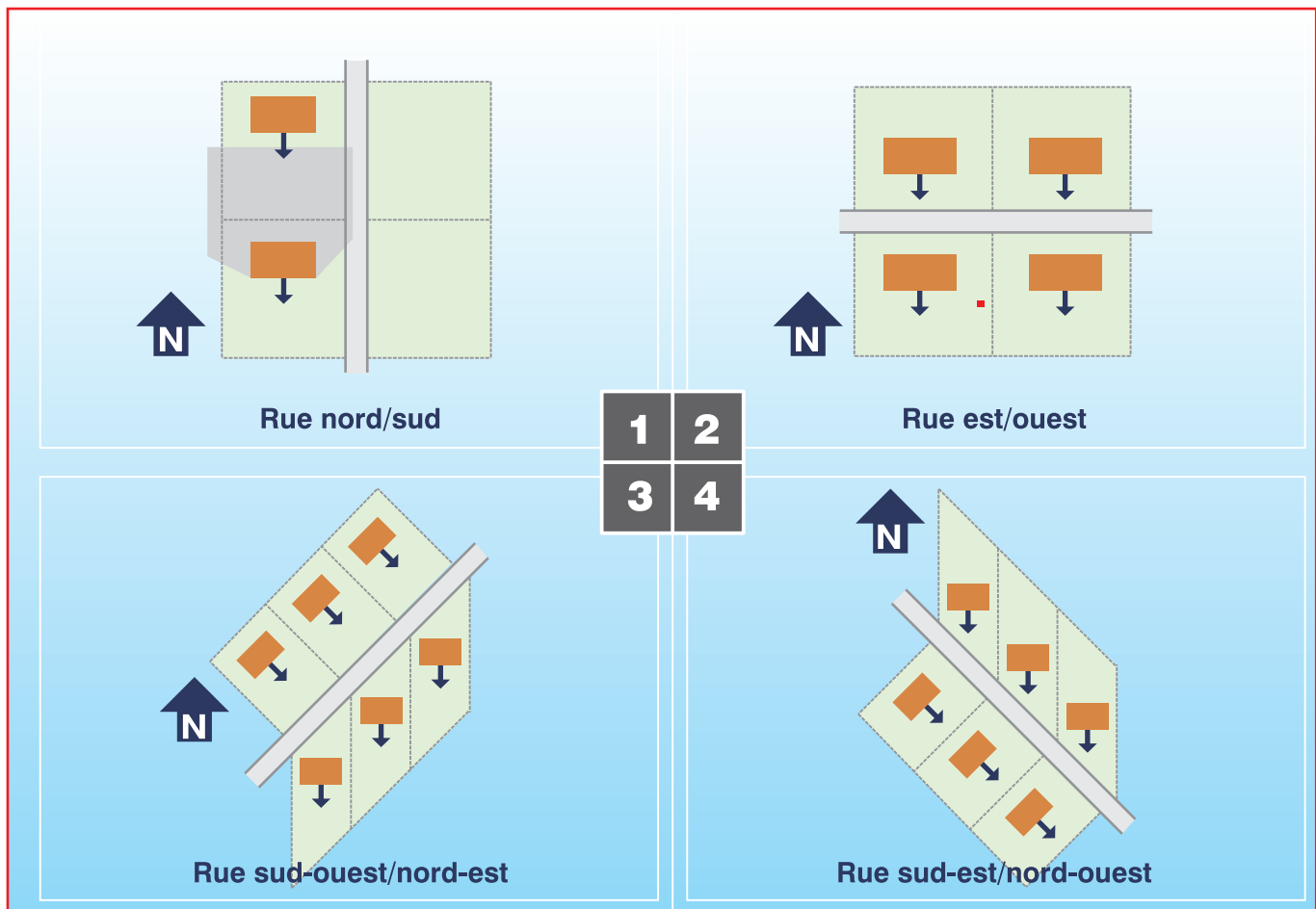
1 Jean-Louis Izard, Alain Guyot, *Archi bio*, Éd. Parenthèses, 1979.

2 Unité interaction énergie environnement, *Manuel de conception – architecture solaire passive pour la région méditerranéenne*, publié pour la Commission européenne par le Centre commun de recherche et la Direction générale de l'énergie.

De l'analyse complète
d'un site, on peut déduire
les zones les plus
favorables à l'urbanisation
et les orientations à
privilégier.



Distances entre bâtiments à respecter
suivant le nombre de mois d'ensoleillement
souhaité.



2 Disposition des parcelles suivant le maillage des rues (d'après le conseil général des Deux-Sèvres).

On nomme généralement "microclimat" celui qui est l'effet de l'action humaine (plantations et constructions, ou dégradations) ; il est donc "local" principalement, mais le développement durable a précisément pour but de montrer que les conséquences de ces actions changent aujourd'hui d'échelle.

Il faut donc être conscient de l'existence de microclimats locaux et en tenir compte dans les calculs et modélisations d'un site. On trouve de nombreux exemples en milieu rural, tels que le "bocage", un maillage végétal qui protège l'habitat et les cultures ; ou le simple platane du midi, qui fait de l'ombre en été et laisse passer le soleil en hiver.

Les microclimats urbains sont plus complexes car ils dépendent de la morphologie des îlots, des espaces publics et les facteurs entrant en ligne de compte sont nombreux ; les champs radiatifs thermiques et l'action du vent doivent prendre en compte un grand nombre d'obstacles pour être modélisés.

Mais on peut aussi utiliser ces facteurs pour créer des microclimats et agir sur les paramètres de confort en milieu urbain. On connaît des moyens architecturaux tels que les galeries urbaines couvertes, en climat froid, ou les dais recouvrant les marchés en climats chauds ; des moyens mécaniques de ventilation ou de chauffage des espaces extérieurs ; mais des éléments urbains tels que des surfaces d'eau, la présence de végétaux, ou même le type de revêtement de sol peuvent jouer un important rôle de "correctif" des ambiances extérieures.

Ainsi, les effets d'une masse végétale sont nombreux¹ :

- oxygénation de jour grâce à la photosynthèse, qui absorbe du CO₂ et de l'eau ; pour que ce facteur soit effectif, la masse du végétal joue un rôle, mais aussi sa localisation, son essence et la période de l'année ;
- humidification de l'air la nuit, par réaction inverse ; mais aussi la journée, par l'évapotranspiration des plantes, celle des pluies et de la rosée ;
- fixation des poussières : par la position de brise-vent des arbres et par le pouvoir adhésif de matière huileuse sur les feuilles ;
- diminution de l'éblouissement par l'absorption des rayons directs (courte longueur d'onde) et émission d'une lumière plus diffuse (grande longueur d'onde) qui, en outre, chauffe moins les surfaces environnantes ;
- amortissement des bruits, pour des plantations de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ;
- filtre et amortissement des vents par la masse foliaire, diminuant sensiblement en aval leur vitesse et les phénomènes de turbulence. Ceci dépend de la "porosité" de la couronne des arbres et donc des essences choisies.

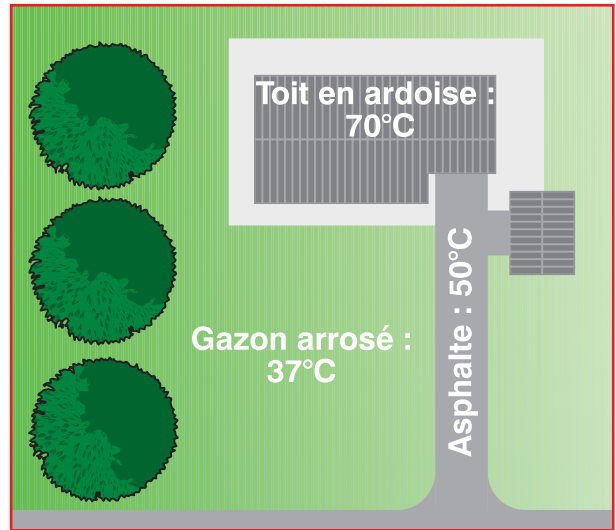
Les plans d'eau également consomment de l'énergie (de la chaleur) pour leur évaporation et donc rafraîchissent l'air ambiant ; si le plan d'eau est à l'ombre des arbres, ils maintiendront cette fraîcheur au niveau du piéton.

Les revêtements de sol enfin ont un impact climatique qui dépend de leur taux d'absorption, de conductivité et de réflectivité des rayonnements thermiques et capacité d'absorption de l'eau². L'asphalte et le béton absorbe énormément de chaleur et très peu d'eau : ils rayonnent ensuite et fonctionnent comme des "radiateurs" urbains de jour et de nuit. En climats chauds, on peut les ombrager au maximum, voire les remplacer par des types de pavages plus poreux. Enfin le sable, le béton, l'eau sont des surfaces réfléchissantes, éblouissantes, qui sont gênantes à proximité des lieux de vie.

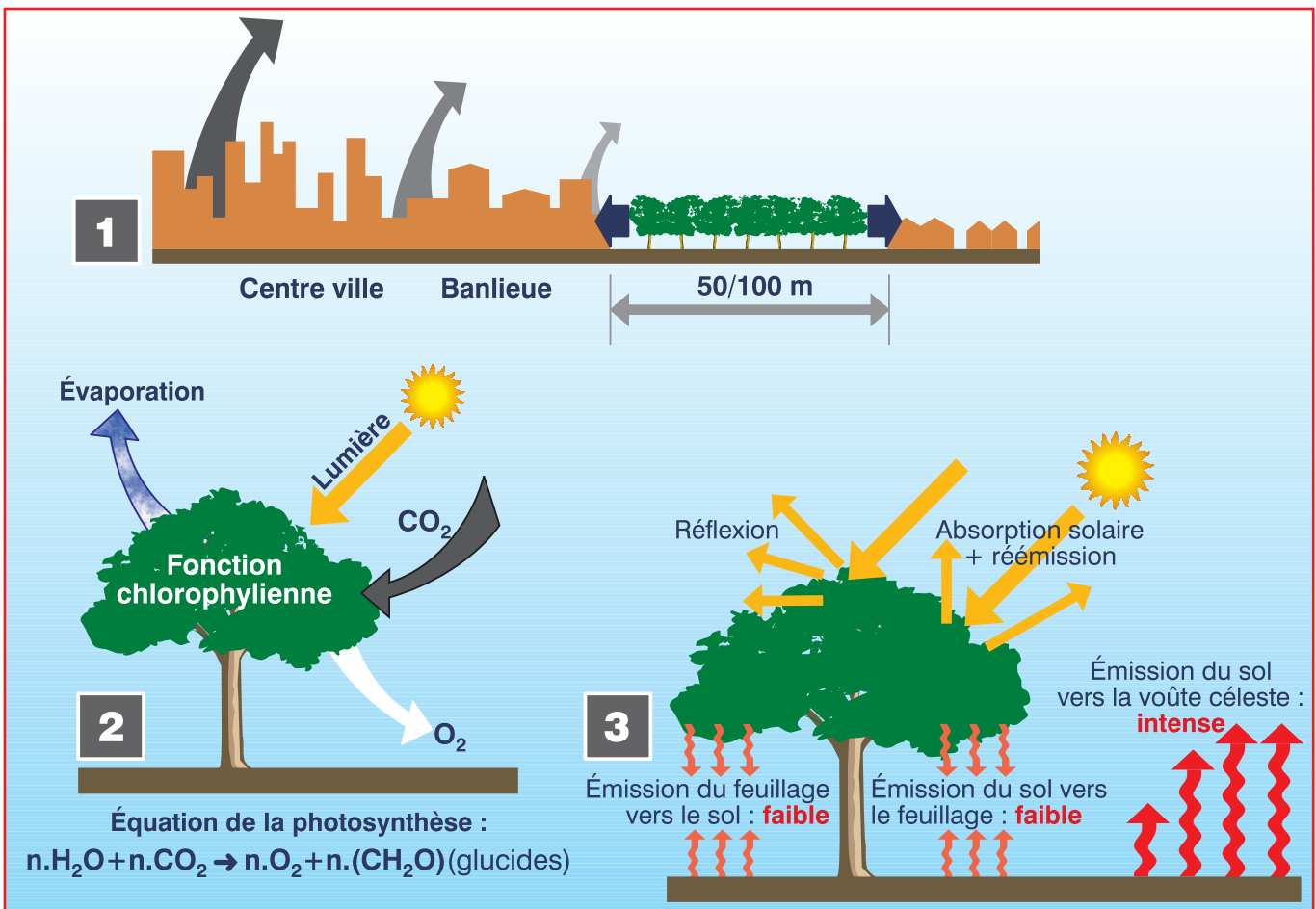
¹ Jean-Louis Izard, Alain Guyot, *Archi bio*, Marseille : Éd. Parenthèses, 1979, p. 33 à 37.

² Commission of the European Communities, *Energy in Architecture*. The European Passive Solar Handbook, Bruxelles : Batsford, 1992, p. 54 à 55.

Le “microclimat” résulte de l’effet de l’action humaine (plantations et constructions, ou dégradations) : il est donc principalement local.



Température de surface affectant la température du bâtiment (d’après le Centre commun de recherche et la Direction générale de l’énergie de la Commission européenne).



1. Effet d’humidification : une bande de végétation suffisante peut créer une baisse de t° de 3,5 °C et une augmentation de 5 % de l’humidité relative (d’après J.-L. Iazard).
2. Effet d’oxygénation.
3. Action d’absorption et de ré-émission du rayonnement solaire.

Les climats chauds présentent deux exigences : une bonne ventilation des espaces de vie, pour refroidir l'air ambiant sans gêner les usagers et leurs activités ; et le souci d'accumuler le moins possible de chaleur, notamment en réfléchissant le rayonnement solaire au lieu de l'absorber. La ventilation sera autant que possible naturelle, en créant des dépressions pour engendrer le mouvement d'air (cf. tome 3) ; on prône également d'isoler soigneusement les bâtiments, mais dans le but, ici, de garder la fraîcheur à l'intérieur ; dans les constructions traditionnelles d'une médina (cœur des villes arabes) les murs sont aussi épais que ceux des fermes de villages ardennais ; par contre, ils sont souvent blanchis à la chaux, pour refléter le rayonnement au lieu de l'absorber comme le fait la pierre naturelle.

Au point de vue urbain, deux paramètres jouent un rôle important dans les choix d'implantation en climats secs et chauds : le premier est la présence d'eau et de végétation, car ce seront des facteurs de refroidissement naturel, en humidifiant l'air et en ombrageant les sols ; le deuxième paramètre à considérer est l'importance de la pente du terrain et son orientation, car ce sont elles qui définiront le taux de ventilation potentielle du site.

Dans une étude réalisée pour l'implantation d'une nouvelle communauté à Sobradinho, aux alentours de Brasilia¹, il a été établi que les parties du site les plus favorables au confort thermique (et donc, attribuées à l'habitat, au commerce et à l'industrie) étaient les plateaux (zones inclinées de moins de 10 %) ; puis les collines orientées au sud-est (avec une attention spécifique aux sols qui selon les pentes et avec le déboisement, risquent l'érosion et des éboulements) ; enfin les collines orientées au nord-ouest et en dernier, le fond des vallées. Les zones qui bordent les rivières ou les plans d'eau, les terres à plus de 100 m d'altitude au-dessus des plateaux et les pentes de déclivité supérieure à 20 %, sont des zones naturelles où l'on préserve la végétation. Les zones restantes sont consacrées à l'agriculture.

Dans la conception de l'urbanisation même, on a posé comme principes que :

- l'air frais qui descend au fond des vallées doit pouvoir pénétrer tous les quartiers urbains prévus ;
- les surfaces urbaines artificialisées, imperméables, ne doivent pas dépasser 70 % de la surface totale des plateaux constructibles ;
- des zones tampons doivent être prévues entre les rues à grand trafic et les logements ainsi que les zones d'activités extérieures permanentes ;
- la morphologie urbaine doit proposer des structures de construction et de mobilier qui laissent le vent entrer horizontalement dans les espaces de vie.

Les larges espaces ouverts, très exposés au soleil, sont à travailler soigneusement en climats chauds, la végétation étant souvent utilisée dans ce but : elle absorbe moins de chaleur que les matériaux de construction (on préférera une treille avec plantes grimpantes pour couvrir une terrasse) ; l'évapotranspiration augmente l'humidité relative de l'air et régule la température ; par sa porosité, c'est un coupe-vent qui crée moins de turbulence qu'un mur. Une surface d'eau aussi refroidira l'air en s'évaporant.

On peut généralement penser que la densité urbaine est également favorable dans les climats chauds, car elle limite les surfaces exposées aux rayons. Par contre au sud des USA, par exemple, le mode de vie suburbain engendre une consommation d'énergie énorme pour le refroidissement ambiant (par des systèmes d'air conditionné), en plus des déplacements motorisés.

¹ Marcio Villas Boas, "Environmental criteria and design principles for a new community in Brasilia", *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA '98 in Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998, p. 137 à 140.

En climat chaud, on s'attache à favoriser une bonne ventilation des espaces et à éviter l'accumulation de chaleur par les matériaux.



La densité urbaine est un facteur traditionnel favorable à la préservation contre la chaleur (village provençal de Mons).



1



2

2 Les villes satellites qui se sont urbanisées spontanément autour de Brasilia sont aujourd'hui repensées selon des critères bioclimatiques.

1. L'urbanisation autour du plan pilote de brasilia (source : <http://www.brasilia.jor.br/Cidades.htm>).

2. Plan prévu pour un quartier de Sobradinho, au NE de Brasilia.

Dans de nombreux pays, la "planification énergétique urbaine" est une pratique déjà bien ancrée, suscitée par les chocs pétroliers des années 1970, et visant à la maîtrise de la consommation énergétique¹ ; de plus en plus de communautés urbaines, collectivités ou communes s'organisent aujourd'hui pour se définir localement des politiques cohérentes en matière d'énergie. Elles peuvent concerner les bâtiments publics et les services de leur ressort, mais aussi s'étendre aux entreprises privées, ou à l'habitat des particuliers, comme dans l'exemple de Utrecht, ci-dessous.

La première phase doit se composer d'un bilan analytique à travers l'étude préliminaire de la situation existante, le recensement des besoins, des consommations en cours, et des acteurs en jeu (fournisseurs, consommateurs, intermédiaires). Il s'agit ensuite de repérer les "groupes-cibles" potentiels, d'évaluer les améliorations, rénovations, rationalisations nécessaires, puis de chiffrer les conséquences en termes financiers, mais aussi de consommation d'énergie fossile et de production de CO₂.

On tente ensuite de rendre ces objectifs opérationnels via des scénarii et des projets ciblés et coordonnés. Leur mise en application se fait souvent en plusieurs phases itératives, avec évaluations intermédiaires, dans des temporalités d'une dizaine d'années. Ces politiques peuvent toucher tous les secteurs : l'industrie, le tertiaire, l'habitat et les bâtiments publics ; elles déclinent aussi une diversité de domaines d'action : la cogénération, les énergies renouvelables, "l'efficacité énergétique", la mise en place d'un "Service Énergie" dans la collectivité, l'information et l'incitation, etc.

À Utrecht, par exemple², la politique énergétique urbaine, en réflexion depuis 1986, est assurée par la municipalité et la compagnie locale d'énergie REMU. Elle s'est focalisée sur quelques domaines préférentiels :

- habitat : une campagne pour la réhabilitation énergétique des bâtiments a été menée et une centaine de maisons ont été rénovées. Un conseil en énergie est effectué gratuitement, les banques proposent des crédits à des taux très avantageux et des réductions sur leurs prestations aux entreprises ;
- bâtiments municipaux : rapports énergétiques, programme global de sensibilisation et formation complémentaire, etc. C'est une volonté politique de la ville d'Utrecht de faire de ses propres bâtiments un modèle ;
- efficacité énergétique : un Plan municipal de chauffage et un réseau de chaleur extensif ont été mis en place. Une première installation de tri-génération est en service dans un centre commercial lié à la gare centrale ;
- Leidsche Rijn : ce nouveau quartier, avec 30 000 logements et industries d'ici l'an 2010 générera une augmentation de 24 % des émissions de la ville. Afin de limiter les consommations énergétiques, on a prévu le raccordement au réseau de chaleur, la construction de maisons à faible consommation énergétique, une eau sanitaire chauffée à l'énergie solaire, la limitation du trafic individuel et une bonne connexion du transport public au centre ville ;
- éclairage public : l'ensemble des lampes d'Utrecht est remplacé par des lampes à faible consommation d'électricité ;
- incitation et formation : les habitants sont régulièrement informés de l'évolution de leur consommation et des formations proposées par le REMU.

1 Cf. *La planification énergétique urbaine : actions de villes européennes, état de l'art*, coll. Connaître pour Agir, août 2000.

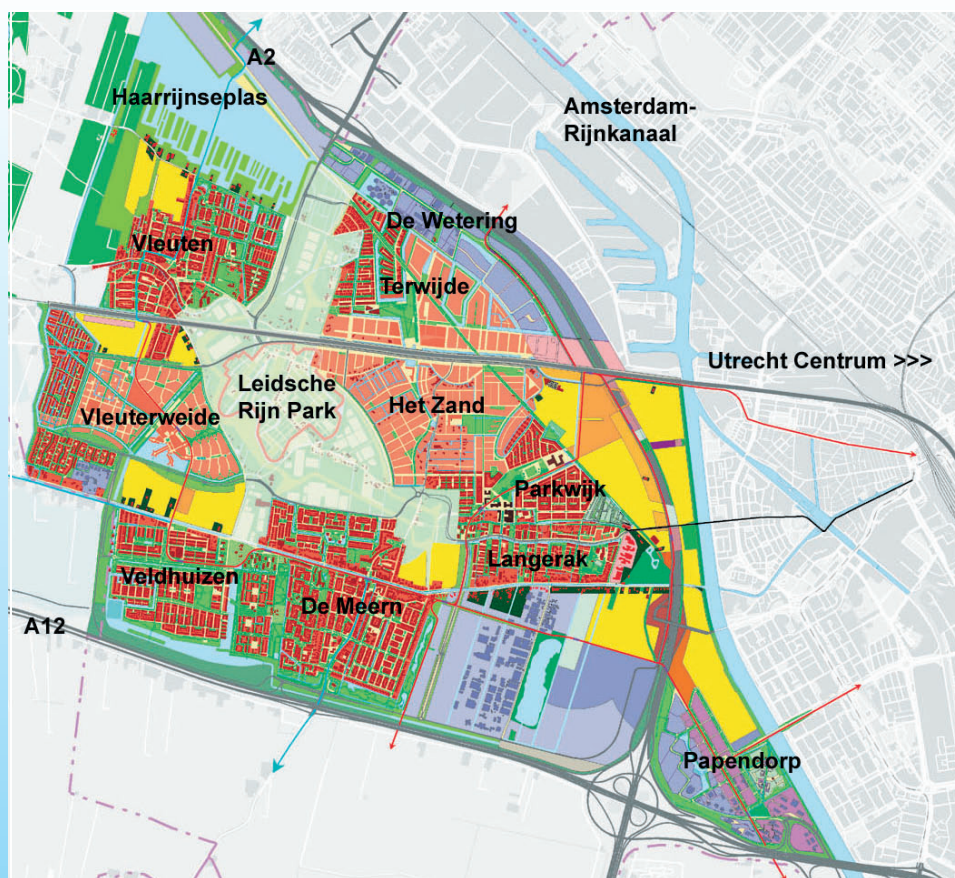
2 Cf. les fiches réalisées par "Énergie-Cités" dans le cadre du programme ALTENER de la Commission européenne (DG TREN).

La “planification énergétique urbaine” vise à une maîtrise globale des dépenses en énergie, dans les bâtiments et services publics mais aussi les entreprises et l'habitat.



La “solar-tower” de la gare de Freiburg, première ville à concevoir en Allemagne une planification énergétique urbaine.

1



2 Le nouveau quartier de Leidsche Rijn à Utrecht (NL), intégré dans la planification énergétique de la ville, et alimenté par un réseau de chaleur urbain.

L'une des actions récurrentes de la planification énergétique urbaine est la valorisation des énergies locales, de récupération et renouvelables.

Une option intéressante est de favoriser le développement des réseaux de chaleur plutôt que le chauffage individuel. En effet, à énergie égale, les réseaux de chaleur optimisent les consommations énergétiques, donc les émissions de CO₂. Les collectivités disposent de moyens pour favoriser l'utilisation collective de l'énergie, via les documents d'urbanisme locaux¹.

Dans ces réseaux de chaleur, on peut inciter à l'utilisation des combustibles moins polluants tels que le gaz, ou à celle des énergies renouvelables : la géothermie (système qui chauffe déjà 500 000 habitants en France), le "bois-énergie", ou la chaleur de récupération industrielle. Les collectivités peuvent capter - ou soutenir des opérateurs locaux à capter - l'énergie hydraulique des montagnes, l'énergie éolienne des zones ventées, ou encore l'énergie solaire pour les piscines, les parcmètres, les signalisations lumineuses. Une réflexion doit aussi être menée sur l'optimisation des systèmes énergétiques mis en place, en développant la cogénération, ou en améliorant les conditions de combustion.

Quelques techniques et moyens d'application à développer² par les collectivités locales :

- structurer et développer la filière "bois-énergie" afin de garantir une optimisation des coûts et une fiabilité d'approvisionnement ; soutenir les projets de chaufferie au bois dans les ensembles de logements et le tertiaire ;
- soutenir la diffusion du solaire thermique : une technique adaptée aux hôtels, aux hôpitaux, maisons de retraites et aux lieux d'accueil du public ; pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des piscines, ainsi que le chauffage par système solaire combiné ; il faut pour cela développer l'emploi et la formation autour de cette filière ;
- demander l'examen de la solution "solaire thermique" et de la solution "bois-énergie" dans toute étude préalable, lors d'opération de construction ou de réhabilitation lourde de bâtiments du patrimoine public ou de logements sociaux ;
- inciter les industriels à la valorisation systématique du potentiel énergétique des déchets non recyclables. L'incinération des ordures ménagères donne lieu à un apport énergétique substantiel, qui permet des économies de traitement ainsi qu'une récupération d'énergie. Celle-ci est souvent utilisée pour le chauffage urbain ou industriel : 1 Parisien sur 10 est chauffé avec les déchets de Paris. En 1996, le taux de déchets plastiques traités par incinération avec récupération d'énergie était de 35 % en France : recyclage matière et récupération d'énergie confondus, plus du tiers des emballages plastiques sont actuellement valorisés en France³ ;
- soutenir le développement de la cogénération ; évaluer les potentiels de la production hydraulique ainsi que du gisement éolien ; celui-ci est favorable sur de nombreuses côtes, et son potentiel est maximal dans le cas où la filière "offshore" est envisageable.

1 On peut se référer au site : www.intercommunalite.com

2 Cf. par exemple les choix de la région "Provence-Alpes-Côte d'Azur", sur le site : <http://www.paca.drivre.gouv.fr/energie>

3 Selon l'Union des industries chimiques en France : www.uic.fr

De nombreuses techniques existent et doivent être valorisées pour favoriser l'utilisation des énergies locales, de récupération et renouvelables.



L'Usine d'incinération des ordures ménagères (UIOM) du Grand Lyon dont la production de vapeur est transformée en électricité.

1

	Chaudières industrielles			Chaudières collectives			Total		
	Puissance installée (MW)	Consommation de bois (tep)	Nombre	Puissance installée (MW)	Consommation de bois (tep)	Nombre	Puissance installée (MW)	Consommation de bois (tep)	Nombre
Alsace	6,13	1 088	9	8,775	2 696	21	14,905	3 784	30
Aquitaine	2,335	16 202	7	19,584	3 109	29	21,919	19 311	36
Auvergne	17,96	4 978	29	13,755	15 380	18	31,715	20 358	47
Basse-Normandie	2,49	480	2	8,955	3 702	9	11,445	4 182	11
Bourgogne	45,579	13 219	20	22,125	5 792	36	67,704	19 011	56
Bretagne	24,38	9 257	17	17,47	2 675	26	41,85	11 932	43
Centre	60,345	12 496	9	12,87	2 964	14	73,215	15 460	23
Champagne-Ardenne	136,56	40 163	26	29,85	11 511	7	166,41	51 674	33
Franche-Comté	68,645	7 003	46	51,272	14 661	99	89,917	21 664	145
Haute-Normandie	0,816	140	4	9,18	4 143	8	9,996	4 283	12
Île-de-France	0,935	120	3	7,66	1 237	6	8,595	1 357	9
Languedoc-Roussillon	1,85	236	2	27,287	4 679	30	29,137	4 915	32
Limousin	8,38	1 611	10	42,985	17 960	20	51,365	19 571	30
Lorraine	26,981	5 292	26	12,381	2 847	23	39,362	8 139	49
Midi-Pyrénées	12,935	1 163	17	12,882	1 507	23	25,817	2 670	40
Nord-Pas-de-Calais	1,2	157	4	8,95	2 870	6	10,15	3 027	10
PACA	3,845	419	11	4,025	589	10	7,87	1 008	21
Pays-de-la-Loire	9,66	2 643	7	8,64	1 859	10	18,3	4 502	17
Picardie	0,4	30	1	0,475	115	4	0,875	145	5
Poitou-Charentes	44,995	12 519	27	26,985	5 810	93	71,98	18 329	120
Rhône-Alpes	32,725	8 707	42	122,897	23 303	145	155,622	32 010	187
Total France	479,14	137 923	319	475,86	130 616	646	955,00	268 539	965

1 tep = 11 626 kWh = 3 tonnes de bois à 20 % d'humidité

2 Tableau de synthèse des chaudières au bois installées en France (source : <http://www.ademe.fr/collectivites/bois-energie/pages/chauff/fchauff.htm>).

La pollution atmosphérique reste à juste titre un sujet de préoccupation majeur des autorités sanitaires. Les études menées depuis la fin des années 80 établissent le lien entre pollution et augmentation de la mortalité chez les personnes sensibles, augmentation des hospitalisations et l'accroissement des problèmes respiratoires chez les enfants et les adultes.

Le bilan peut paraître sombre. Il faut pourtant se rappeler qu'en décembre 1952, le "smog" de Londres causait la mort d'environ 4 000 personnes après un pic de pollution. Une époque où les immeubles étaient chauffés au charbon, où les fumées d'usines n'étaient pas traitées et où les voitures polluaient 20 fois plus qu'aujourd'hui. Au contraire depuis les années 70, on constate en Europe occidentale une lente mais sensible amélioration de la qualité de l'air, à quelques polluants près. La pollution par le dioxyde de soufre (SO₂) a considérablement diminué, mais aussi les oxydes d'azote (NO_x) et les émissions de plomb. En revanche, les concentrations moyennes d'ozone troposphérique¹ poursuivent leur croissance depuis 1995. Par ailleurs, une partie significative de la population européenne est exposée à des concentrations de particules fines supérieures aux valeurs limites. Celles-ci stipulent en effet que les États européens devront se tenir à un niveau annuel moyen de 40 µg/m³ pour les particules jusqu'à 10 µm (PM₁₀) en 2005. En 2010, cette valeur devrait être abaissée à 20 µg/m³.

La réglementation est le premier outil d'aide à l'amélioration de la qualité de l'air. Ainsi, sa surveillance est une obligation des États membres depuis de nombreuses années et les valeurs limites pour les principaux polluants ont progressivement été introduites par la réglementation communautaire : la directive 96/62/CE relative à l'évaluation et à la gestion de la qualité de l'air ambiant, la directive 99/30/CE fixant les valeurs limites pour le SO₂, les NO_x, le plomb et les particules, la 2000/69/CE les fixant pour le monoxyde de carbone et le benzène. En 2001, la directive 2001/81/CE a établi pour la première fois des plafonds nationaux d'émission pour 4 polluants : le SO₂, les NO_x, les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH₃). En 2002, une directive était consacrée à la maîtrise des pollutions par l'ozone, en fixant là aussi des valeurs cibles.

L'habitat et l'industrie ont réalisé de bons progrès dans le contrôle de leurs émissions. À l'inverse, le secteur automobile représente la première source d'émission de gaz carbonique (CO₂), de monoxyde de carbone (CO), de NO_x et de particules. Les améliorations techniques ont bien permis de diminuer les émissions unitaires des véhicules, mais ces gains sont anéantis par l'augmentation de la circulation automobile, dont le transport de marchandises, et la promotion de véhicules gourmands en énergie (4x4, climatisation...).

C'est pourquoi depuis quelques années, les pouvoirs publics, mais aussi certaines entreprises, mettent en place des moyens de réduire le trafic automobile et ses nuisances. Par exemple, en France, les villes de plus de 100 000 habitants doivent élaborer des Plans de déplacements urbains (PDU), les autorités locales du Royaume-Uni sont tenues d'avoir un *Local Transport Plan* (LTP) et les villes italiennes un *Piano Urbano di Mobilità* (PUM). Quelques exemples :

- instruments économiques : instauration de péage urbain ; redevance à l'utilisation de la route ; exonération fiscale pour l'achat de véhicules propres ;
- véhicules : flottes de véhicules propres (électriques, au gaz, biocarburants, etc.) ; stationnement gratuit pour les véhicules électriques ; location de véhicules électriques ;
- gestion du trafic : limitation de la vitesse ; transfert des plates-formes de marchandises à la périphérie des villes ; circulation alternée ;
- mobilité des entreprises : incitation à l'usage des transports collectifs ; organisation du co-voiturage ; plan de déplacement domicile-travail ;
- transports collectifs : création de tramways, de couloirs de bus en site propre, de parcs de stationnement aux gares de train ou métros en banlieue ;
- aménagement urbain : requalification de rues en zones piétonnes ; suppression de places de stationnement ; extension des trottoirs ; création de pistes cyclables.

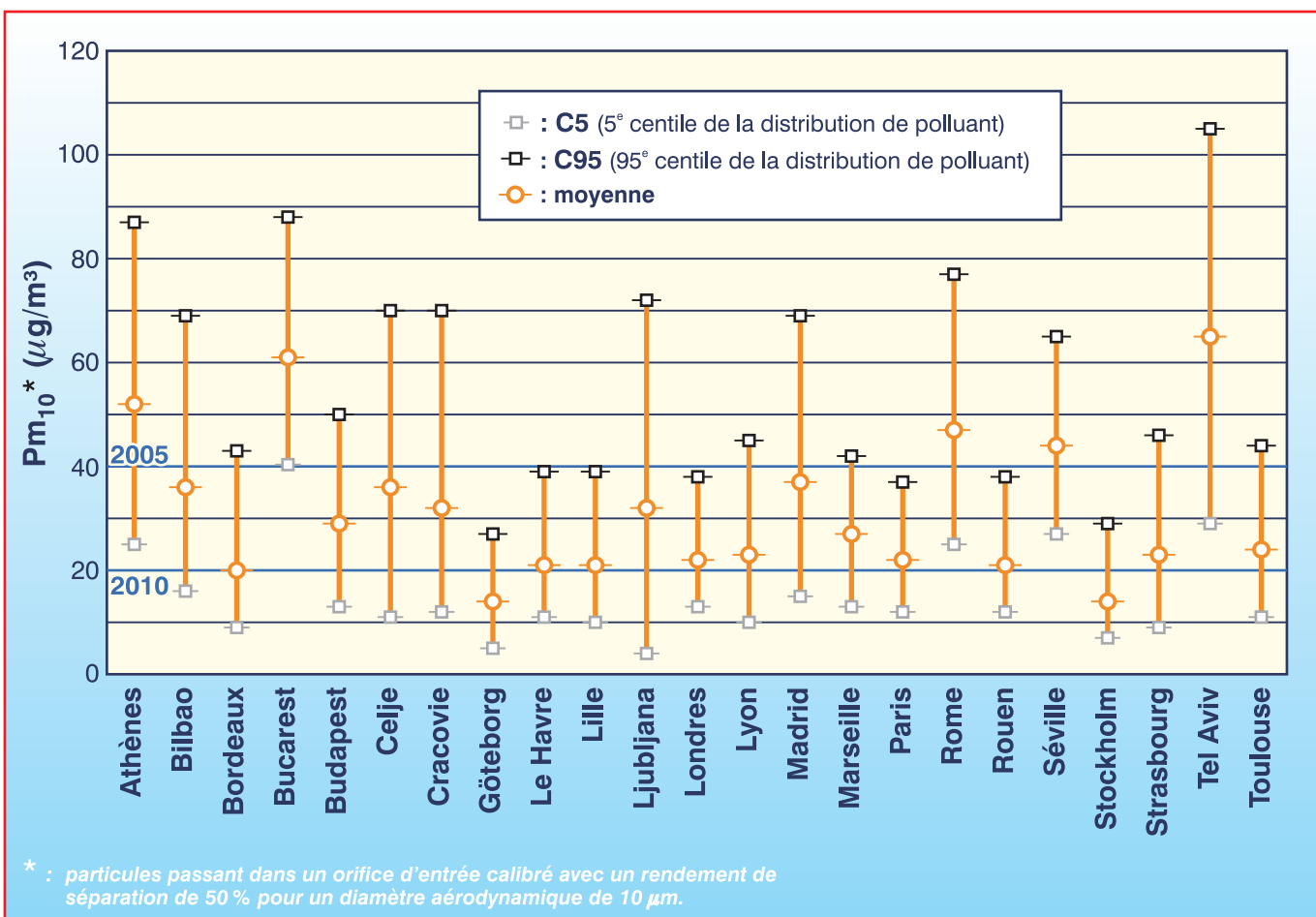
1 Ozone qui stagne au niveau du sol et provient de la dégradation des polluants par les rayons du soleil.

2 "L'évolution de la qualité de l'air en France", ministère de l'Écologie et du Développement durable, 10 mai 2004.

Depuis les années 70, on constate en Europe occidentale une lente mais sensible amélioration de la qualité de l'air, à quelques polluants près.



La voiture hybride permet de réduire sensiblement les émissions de CO₂ en milieu urbain (source : Toyota, modèle Prius 2004).



2 Valeurs annuelles moyennes et 5° et 95° centiles de la distribution de PM₁₀ (d'après le rapport 2002-2003 de l'Apheis – Air Pollution and Health, a European Information System – paru en juillet 2004).

La voiture individuelle, particulièrement en ville, est la plus grande source d'émission de gaz à effet de serre, par km et par voyageur. Néanmoins ce mode de déplacement est prédominant dans les usages et 99 % des véhicules routiers fonctionnent encore aujourd'hui avec des moteurs à combustion. Aussi des recherches importantes sont en cours¹ et portent sur :

1. l'optimisation de l'ensemble moteur/carburant/ligne d'échappement pour les oxydes d'azote, les particules diesel, les nuisances liées au bruit, etc. ;
2. la réduction de la consommation et donc des rejets de CO₂: moteurs plus petits, gestion des fluides, transmission à la roue, aérodynamisme, allègement ;
3. le développement de la traction électrique et/ou hybride. La voiture électrique est connue depuis plus d'un siècle : en 1899, la "Jamais contente", équipée de batteries plomb acide, était le premier véhicule à dépasser les 100 km/h ; elle a connu un regain d'intérêt dans les années 80, avec le programme AVERE (Association européenne des véhicules électriques routiers) de la CEE.

Mais en 2002, on ne compte encore que 11 000 véhicules électriques en Europe, dont 8 000 en France. Les modèles commercialisés ne sont pas assez performants pour attirer le public : une autonomie de 100 km, après 5 heures de recharge des batteries, et une vitesse de pointe peu élevée (90 km/h). Pourtant, des études concernant la conurbation de Paris montrent que les déplacements moyens ne sont que de 25 kilomètres par jour, dont 75 % assez nettement inférieurs. D'autres atouts également : pas de vignette, un permis simplifié, une assurance annuelle raisonnable, des places de stationnement gratuites, etc.

Techniquement, la voiture électrique est encore très améliorable : des prototypes atteignent aujourd'hui une autonomie de 210 km et une vitesse de pointe de 120 km/h ; une batterie Li-Ion permet de concentrer deux fois plus d'énergie dans le même volume et ne nécessite pas d'entretien. On se tourne également vers le concept de véhicules hybrides (moteur électrique en ville, moteur diesel pour la route) qui permettrait une économie de 30 % du carburant.

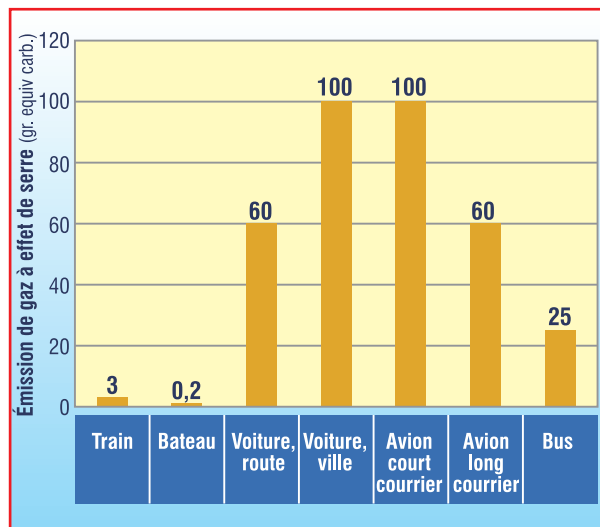
Mais la politique d'incitation est encore trop faible pour lancer le marché, face au lobbying des pétroliers, et à la manne financière que représente la taxation sur les carburants par l'État (plus de 80 % du prix affiché). Il faut aussi noter que l'absence de bruit est un avantage qui n'est lié qu'à la faible vitesse ; que le changement de carburant ne diminue pas le nombre de voitures dans les villes et donc leur congestion ; que la voiture électrique pollue aussi dans la mesure où les centrales électriques utilisent du charbon, du pétrole ou du gaz naturel ; enfin, que la surconsommation électrique exigera de développer les centrales nucléaires, ce qui ne fait pas l'unanimité de l'opinion publique.

Cependant, de nombreuses expériences existent et sont des pratiques à étudier², comme le "libre-service" proposé à La Rochelle : une flotte de 50 véhicules électriques est mise à disposition des usagers inscrits dans 6 stations réparties dans l'agglomération. Ces modes de transport propres sont bien adaptés par ailleurs aux usages d'une municipalité, car : leur autonomie correspond à un usage urbain ; les infrastructures de recharge sont mieux amorties au sein d'une flotte importante avec une gestion centralisée ; ils respectent l'environnement et contribuent à l'image citoyenne de la commune.

1 Cf. en France le PREDIT 3 (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres) : <http://www.predit.prd.fr>

2 Cf. les études de cas du CEREVEHE (Centre d'études et de recherches sur les véhicules électriques et hybrides en Europe) : <http://www.cereveh.org/>

De nombreuses recherches portent sur la réduction de la pollution émise par les voitures, notamment grâce au développement de moteurs électriques ou hybrides.



1 Émissions de gaz à effet de serre (en gramme équivalent carbone) liées au transport d'un passager sur 1 km (d'après J.-M. Jancovici).



2 Les transports non polluants proposés à La Rochelle par "Liselec" (service par abonnement) (source : www.agglo-larochelle.org).

L'aménagement urbain peut agir en faveur des modes de déplacements respectant l'environnement, en travaillant sur les manières d'utiliser l'espace public. L'enjeu principal est de favoriser l'accessibilité de l'espace urbain à tous, que cette accessibilité soit géographique (réseaux de transports, usage des sols), économique-sociale (allocations, tarifs réduits) ou encore physique¹ : cette dernière peut s'élaborer au moyen de microaménagements.

Il s'agit d'une échelle d'intervention qui correspond à des valeurs urbaines et citoyennes renouvelées, qui ne se basent plus sur un "utilisateur moyen" et sur le mode prépondérant (la voiture) pour organiser la ville. Les enjeux des microaménagements sont inscrits dans le développement durable :

- le droit de chaque usager à accéder à tout l'espace urbain, pour que tous les citoyens, quelles que soient leurs capacités physiques ou intellectuelles, participent à la vie économique et tendre ainsi vers l'égalité des chances ;
- la sécurité de chaque mode de déplacement, et la gestion harmonieuse des rapports entre les différents usagers, afin de donner une place et même de favoriser les modes de déplacements économes en énergies non-renouvelables.

Aussi, de nombreux aménagements en voirie ont pour but aujourd'hui de faciliter la marche à pied dans la ville : on étudie l'ergonomie des trottoirs, la place du mobilier urbain, etc., pour dégager des parcours clairs, pratiques et directs, mais aussi "attractifs" (atténuation du bruit, points de repères, revêtements, éclairage, végétation, concourent à l'agrément de l'itinéraire).

Les aménagements servent aussi à leur sécurité vis-à-vis des voitures : ils contribuent à modérer la vitesse (relief de la chaussée), ils permettent au piéton de voir et d'être vu (l'avancée de trottoir avec neutralisation du stationnement en amont), de raccourcir les traversées de la chaussée (refuges centraux), d'assurer la continuité des cheminements. Ils servent encore à organiser la complémentarité avec les transports en commun : accessibilité des arrêts, voie de circulation en saillie, hauteur de quais, confort de l'attente.

Protéger et favoriser la circulation à bicyclette est aussi un objectif majeur des microaménagements², à nouveau vis-à-vis des voitures (bandes ou pistes cyclables, couloirs mixtes bus-vélo) mais aussi dans les espaces piétonniers (rampes le long des escaliers, traversée d'espaces privés) et en assurant la fluidité des parcours : impasses franchissables, sens uniques ouverts à contresens, bandes d'arrêt avancées aux feux, et conception globale des itinéraires en schémas cyclables cohérents et bien diffusés.

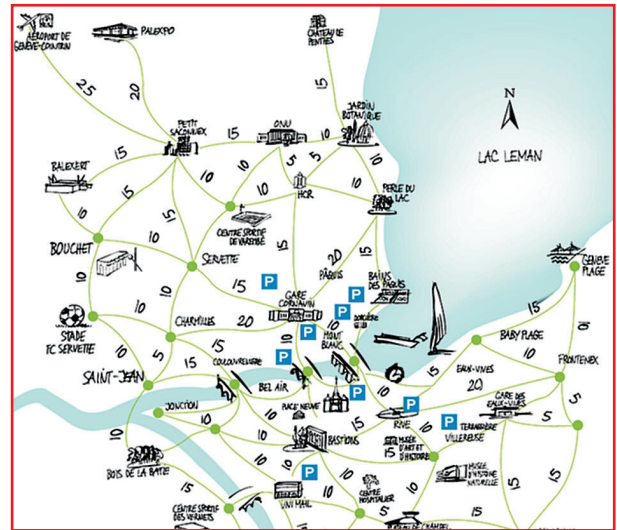
De manière générale, ces aménagements cherchent à retrouver la mixité d'usages de la ville (habiter, se déplacer, travailler, acheter, se détendre, communiquer) ; c'est pourquoi ils doivent faciliter l'usage de tous les modes, comme dans l'exemple à Roubaix (voiture, vélos et piétons) et non d'un seul.

Dans cette même optique, la prise en compte de tous les usagers signifie celle de toutes les formes "d'handicap à la mobilité" : l'âge (enfants ou vieillards), la grossesse ou le caddie des courses, la surdité, la malvoyance, le handicap mental ou la chaise roulante. Les aménagements sont donc à concevoir tant au niveau physique (surfaces tactiles au sol) comme au plan intellectuel (clarté des repères) ou même incitatif, tel que l'installation à Genève des plans de la ville indiquant les parcours en temps de marche à pied.

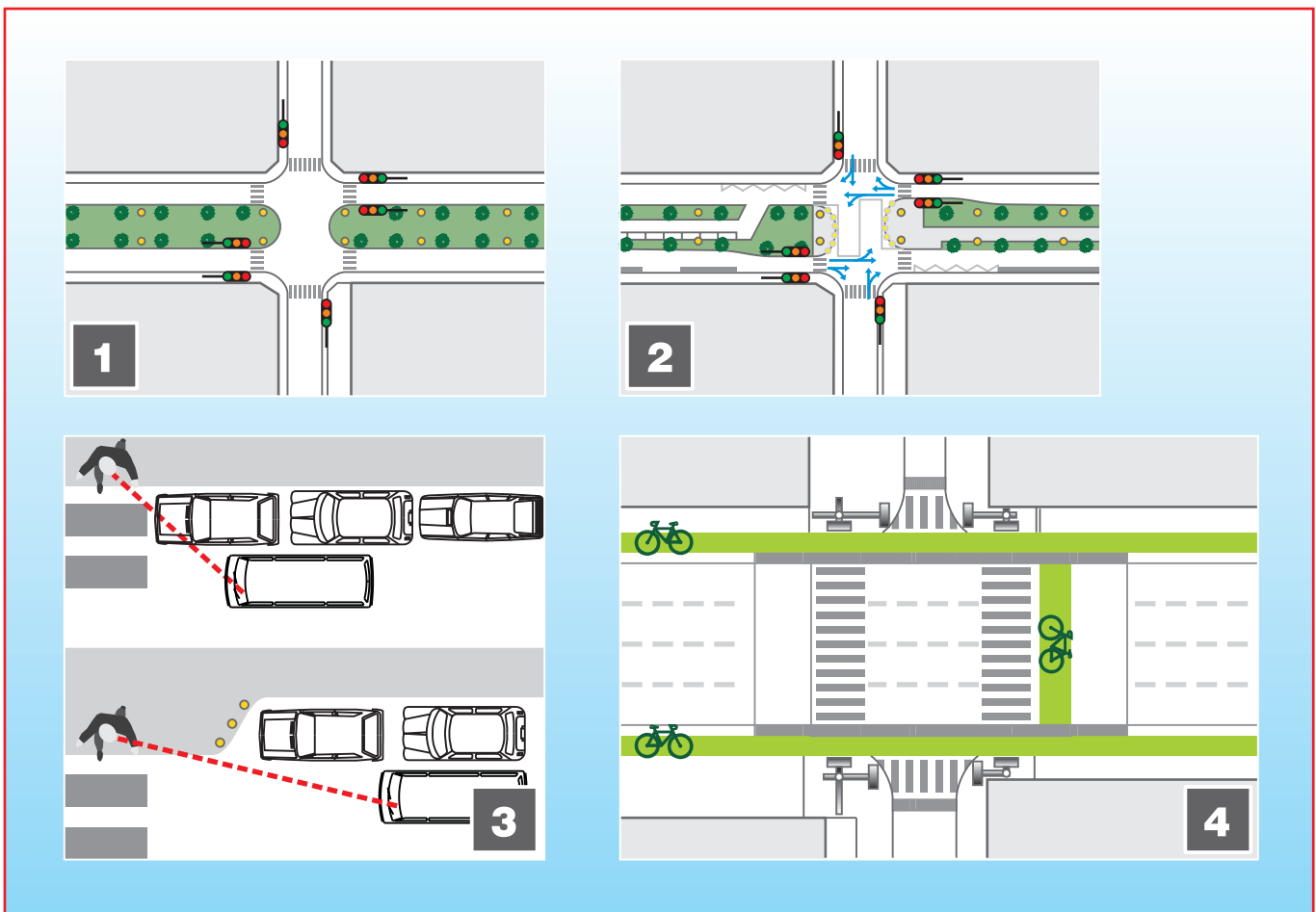
1 Le CERTU (Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme) développe cette notion de "ville accessible à tous" : cf. site www.certu.fr

2 On peut consulter les fiches "Ville&Vélos", du Club des villes cyclables, sur le site www.certu.fr

Les microaménagements ont pour but de permettre à tous l'accessibilité physique de l'espace urbain : ils visent à gérer harmonieusement les rapports entre les différents types d'utilisateurs et à sécuriser chacun d'entre eux.



Plan de Genève avec les temps de parcours à pied. **1**



2 1 et 2. Exemples d'aménagement de carrefour à Roubaix (source : CERTU). 3. "Voir et être vu" (source : CERTU). 4. Le "trottoir traversant" : c'est la voiture qui emprunte l'espace piéton (d'après L. Coveliers) - nouveau code de la rue en Belgique (2004).

L'aménagement urbain peut se concevoir en faveur du développement durable à toutes les échelles, la plus précise d'entre elles étant sans doute celle du mobilier urbain. Cette action à l'échelle du mobilier urbain peut concerner le type d'énergie sollicitée, les matériaux de construction mis en œuvre, mais aussi les usages urbains que la présence du mobilier induira.

Ainsi, le mobilier urbain devient notamment l'une des applications courantes des cellules photovoltaïques. Celles-ci se caractérisent par la production d'une énergie électrique renouvelable, bien entendu, mais aussi par l'autonomie de l'installation vis-à-vis des réseaux. Si cette autonomie est totale, il est nécessaire de stocker l'énergie pour les périodes non ensoleillées dans des batteries. C'est le cas des "plots lumineux" utilisés pour améliorer la lisibilité des chaussées, pour éclairer les chemins piétonniers, les parcs, etc. Les panneaux de ces plots captent l'énergie en journée pour la restituer la nuit à haute densité. C'est une alternative 90 % moins cher que l'éclairage public ; les batteries fonctionnent plusieurs jours, mais ont une durée de vie de 5 ou 6 ans.

L'énergie solaire photovoltaïque est généralement sollicitée lorsque le réseau public est inaccessible ou que le raccordement est trop cher ; elle constitue donc également un bon mode d'action pour réduire les coûts liés à l'étalement urbain, comme celui de l'éclairage public, mais aussi des téléphones d'urgence le long des grandes voies de circulation ; elle alimente aussi, en milieu urbain plus dense, les dispositifs d'affichage du temps d'attente dans les abri-bus, les mécanismes à rouleau de la publicité, la desserte en eau des toilettes publiques ou le fonctionnement des horodateurs¹.

Le mobilier urbain dans son mode constructif est également un enjeu de développement durable. Ainsi, plusieurs opérations s'inscrivant dans le cadre des Agendas 21 locaux, visent à remplacer le mobilier urbain en plastique ou métal, par des réalisations en bois local (épicéa, frêne, peuplier). Outre l'économie en transport, on favorise une source renouvelable, donc durable, de matériaux. Au point de vue économique et social, cette mesure encourage la participation des entreprises locales et permet la revalorisation des métiers traditionnels du bois.

En région wallonne (Belgique) également, le secteur public est un moteur de soutien à la filière bois, en promouvant son usage dans les bâtiments publics, et dans le mobilier urbain, rural ou forestier : le Ravel (Réseau autonome de voies lentes) qui se développe petit à petit dans la région, est l'occasion de concevoir un mobilier spécifique (panneaux poubelles, éclairages, bancs, etc.) qui s'inspire des lieux traversés et des matériaux locaux².

Enfin, notons que le mobilier urbain en soi peut induire par sa seule présence des comportements influençant le développement durable : il peut favoriser des pratiques de mobilité via les transports en commun (confort des abribus, sécurisation des parcours vers la gare, parkings de co-voiturage, etc.) et des habitudes citoyennes en facilitant la pratique du tri des déchets par exemple. On est encore loin d'avoir tout imaginé dans ce domaine et l'innovation est à soutenir : prenons l'exemple de cet "arbre à vélos" imaginé en Suisse, fonctionnant à l'énergie solaire³ : il permet de garer les vélos en hauteur pour dégager la voie publique, les protéger des vols et des intempéries ; c'est aussi un distributeur de vélos de location ; il est actionné par cartes magnétiques.

1 Cf. sites spécialisés tels que : <http://www.sipperec.fr/PDF/CRPhotovoltaik10.03.pdf>

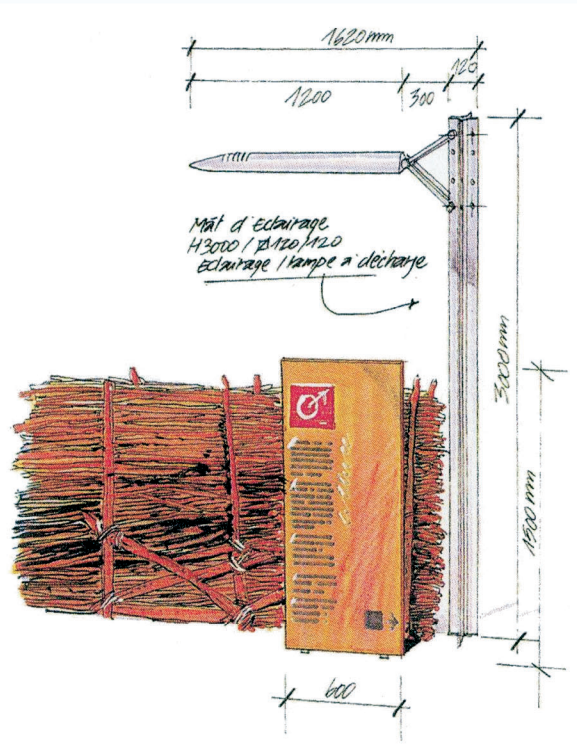
2 J.-S. Balthasart, "Le mobilier public", *Les cahiers de l'urbanisme* n° 27, Direction générale de l'aménagement du territoire de la région wallonne, décembre 1999.

3 Cf. "Bike Tree TM" : <http://www.bike-tree.ch/fr-p01f.htm>

L'aménagement urbain durable peut se concevoir à l'échelle du mobilier urbain, en agissant sur le type d'énergie utilisée, les matériaux de construction, mais aussi les usages urbains qu'il induira par sa présence.



Une innovation : les "arbres à vélos" en Suisse (source : <http://www.bike-tree.ch>).



1 2

1. Mobilier urbain alimenté par le solaire photovoltaïque (source : www.energies-renouvelables.org).
2. Un mobilier public conçu pour le Ravel (Réseau autonome de voies lentes) en région wallonne (Belgique) (d'après Architecture et Design : Ange et Démon, asbl).

CONNAÎTRE LES BASES

L'énergie sur la Terre

1. Le système Terre-Soleil
2. L'énergie solaire
3. Les différents systèmes énergétiques
4. Démographie et énergie
5. Le réchauffement de la planète
6. Les interventions de l'homme en milieu urbain
7. Les interventions de l'homme en milieu rural
8. La notion d'économie d'énergie
9. La notion de maîtrise de l'énergie

L'architecture et les paramètres du climat

10. Les grands climats tropicaux
11. Les climats européens
12. La course solaire
13. Le rayonnement solaire
14. La nébulosité
15. La température
16. L'humidité relative
17. Les précipitations
18. Le vent
19. La lumière
20. L'influence de l'eau sur le microclimat
21. L'influence du relief sur le microclimat
22. L'influence de la végétation sur le microclimat
23. L'influence des constructions sur le microclimat
24. Construire en climats tempérés
25. Construire en climats chauds et secs
26. Construire en climats chauds et humides

L'habitat et les paramètres du confort

27. Le confort thermique
28. La température
29. L'hygrométrie
30. La vitesse de l'air
31. Le confort d'hiver
32. Le confort d'été
33. Le confort respiratoire
34. La composition de l'air et les besoins physiologiques
35. Les sources de pollution extérieure
36. Les sources de pollution intérieure
37. Le gaz carbonique comme indice de la pollution intérieure
38. Le renouvellement de l'air
39. Les déperditions par renouvellement d'air
40. La ventilation
41. Le renouvellement d'air et la ventilation naturelle
42. La récupération d'énergie sur l'air vicié extrait
43. Le confort visuel
44. Les caractéristiques physiques d'une source lumineuse

45. La décomposition du spectre lumineux
46. Le phénomène de luminance
47. Le facteur de lumière du jour
48. La typologie des apports de lumière naturelle
49. La stratégie de l'éclairage naturel
50. La couleur et l'état de surface des parois
51. Le confort acoustique

La réglementation thermique

52. La Réglementation thermique 2000 et son évolution
53. La conductivité thermique λ des matériaux
54. Les caractéristiques thermiques des parois R & U
55. La déperdition thermique de l'enveloppe $U_{\text{bât}}$
56. La consommation conventionnelle d'énergie C
57. La température intérieure conventionnelle d'été T_{ic}
58. Les "garde-fous" thermiques

CONSTRUIRE AVEC LE CLIMAT

Les outils architecturaux

59. Les habitats vernaculaires
60. L'approche bioclimatique
61. La conception solaire passive
62. Systèmes solaires passifs, actifs et hybrides
63. L'implantation
64. L'orientation
65. Le zonage thermique et les espaces tampons
66. La thermocirculation
67. Les ouvertures
68. Les fenêtres
69. Les masques et les protections solaires
70. Les serres et vérandas
71. Les doubles peaux
72. Les murs capteurs
73. Les capteurs à air en façade
74. L'isolation transparente
75. Les capteurs solaires à air
76. Les capteurs solaires à eau
77. L'utilisation de la végétation et de l'eau
78. L'utilisation des sols
79. Les objectifs de la programmation
80. Les outils informatiques de modélisation et de dimensionnement
81. Les logiciels de simulation
82. La thermographie en rénovation

La conception bioclimatique

83. Le coefficient de forme
84. Les déperditions thermiques et l'isolation
85. Les ponts thermiques
86. Les apports internes

- 87. Les apports énergétiques solaires
- 88. Le facteur solaire
- 89. La transmission lumineuse
- 90. La déperdition thermique des vitrages
- 91. L'inertie thermique et le stockage d'énergie
- 92. Le stockage thermique
- 93. La régulation et la programmation du chauffage
- 94. La climatisation

Le choix des énergies renouvelables

- 95. Le choix des énergies renouvelables
- 96. Les capteurs solaires
- 97. Le chauffe-eau solaire à thermosiphon
- 98. Le plancher solaire direct
- 99. Les capteurs à air
- 100. Les capteurs photovoltaïques
- 101. Les toits photovoltaïques reliés au réseau
- 102. Les ressources géothermiques
- 103. L'éolien
- 104. La filière biomasse
- 105. L'hydroélectricité

Exemples d'architectures solaires

- 106. Maison à flanc de colline à Esneux (Belgique)
- 107. Conservatoire de musique à Almería (Espagne)
- 108. Institut de gestion à Ahmedabad (Inde)
- 109. Maison de montagne en Haute-Tarentaise (France)
- 110. Habitations groupées à Lana di Merano (Italie)
- 111. Maison de vacances au bord du Pacifique (États-Unis)
- 112. Maison sur l'île du Ronaldsay (Écosse)
- 113. Réhabilitation d'une maison dans les Pyrénées (France)
- 114. Réhabilitation d'un immeuble de logements collectifs dans la Drôme (France)

CONSTRUIRE EN CLIMATS CHAUDS

Les climats chauds et leurs contextes

- 115. Les climats chauds
- 116. Le climat équatorial
- 117. Le climat tropical humide et tropical de mousson
- 118. Le climat tropical sec
- 119. Le climat désertique
- 120. Le climat chaud d'altitude
- 121. Le climat méditerranéen
- 122. Le mouvement des masses d'air
- 123. Le rayonnement thermique terrestre
- 124. L'approche socio-économique du développement
- 125. L'accès aux énergies
- 126. Les valeurs culturelles

Le confort

- 127. L'approche du confort thermique par la ventilation naturelle
- 128. Le confort physiologique et psychosensoriel
- 129. Le confort visuel
- 130. Le confort acoustique
- 131. Le nomadisme des occupants
- 132. Le confort dans les bâtiments
- 133. L'inertie thermique
- 134. Les isolants
- 135. La ventilation naturelle
- 136. Les brasseurs d'air
- 137. La climatisation complémentaire
- 138. La protection solaire
- 139. La végétation
- 140. Les plantations aux abords des bâtiments

L'insertion dans le site

- 141. Le parcellaire et le plan-masse
- 142. La topographie du site et le vent
- 143. Les caractéristiques du vent
- 144. Les obstacles aérauliques
- 145. L'écoulement de l'air autour d'un bâtiment
- 146. Les champs de pression autour des bâtiments
- 147. La démarche de la ventilation naturelle
- 148. La ventilation traversante
- 149. L'énergie effectivement reçue
- 150. L'insertion dans le climat équatorial
- 151. L'insertion dans le climat de mousson
- 152. L'insertion dans le climat tropical sec
- 153. L'insertion dans le climat désertique
- 154. L'insertion dans le climat chaud d'altitude
- 155. L'insertion dans le climat méditerranéen

Le traitement du bâtiment

- 156. La hiérarchisation des espaces
- 157. Les flux intérieurs
- 158. Les accès
- 159. La véranda
- 160. La porosité à l'air des parois
- 161. La protection de l'extérieur
- 162. La protection des parois extérieures
- 163. Les pare-soleil verticaux
- 164. Les pare-soleil horizontaux
- 165. Les réflecteurs
- 166. Le coefficient d'absorption et la couleur des parois
- 167. La nature de surface des parois et l'émissivité
- 168. Les auvents
- 169. Les percées
- 170. La protection des ouvertures
- 171. La forme de la toiture
- 172. L'isolation du toit

- 173. La ventilation du toit
- 174. Les écopes
- 175. Les tours à vent
- 176. Les pilotis et joues latérales
- 177. La résistance aux cyclones et aux séismes
- 178. Le solaire thermique et le solaire photovoltaïque

CONSTRUIRE AVEC LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Architecture et développement durable

- 179. Multiples visages
- 180. Notion de milieu
- 181. La protection de l'environnement
- 182. Le cycle de vie d'un bâtiment : du berceau à la tombe
- 183. Bilan carbone du bâtiment
- 184. Architecture et énergies renouvelables

Démarches européennes

- 185. La méthode BREEAM en Angleterre
- 186. La démarche HQE en France
- 187. Le standard suisse "Minergie"
- 188. Le label allemand "Habitat basse énergie"

Habiter

- 189. Co-habiter la Terre
- 190. Habiter la matière
- 191. Habiter le fait humain
- 192. Habiter quelque part
- 193. Habiter l'entre-deux
- 194. Les échelles de l'habiter

Acteurs et actions

- 195. Maître d'ouvrage : une démarche volontaire
- 196. Maîtres d'ouvrage, architectes, entreprises
- 197. Localiser, programmer
- 198. Éco-concevoir : concertation et participation
- 199. Gérer

Construction verte

- 200. Utilisation des opportunités offertes par le voisinage et le site
- 201. Gestion des avantages et des contraintes de la parcelle
- 202. L'insertion environnementale
- 203. Adaptabilité et durabilité du bâtiment
- 204. Choix des procédés non pénalisants pour l'environnement
- 205. Choix des produits de construction
- 206. Réduction et gestion différenciée des déchets de chantier
- 207. Réduction des nuisances sonores sur le chantier

- 208. Réduction de la pollution des sols, des eaux et de l'air sur le chantier
- 209. Autres nuisances urbaines du chantier : propreté et sécurité
- 210. La communication de chantier

Gestion harmonieuse

- 211. Réduction des besoins énergétiques et des consommations
- 212. Amélioration de l'efficacité énergétique des équipements
- 213. Recours aux énergies renouvelables
- 214. Réduction de la pollution atmosphérique engendrée par les générateurs à combustion
- 215. L'eau
- 216. Cycle hydrique
- 217. Gestion de l'eau
- 218. Récupération des eaux de pluie
- 219. Assainissement des eaux usées
- 220. Gestion des déchets d'activité
- 221. Entretien et maintenance des bâtiments
- 222. Prise en compte des effets environnementaux des procédés de maintenance

Confort sain

- 223. Confort hygrométrique
- 224. Les protections solaires
- 225. Rappels sur la notion de bruit
- 226. Isolation acoustique
- 227. Correction acoustique
- 228. Bruits aériens, d'impacts et d'équipements
- 229. Zonage acoustique
- 230. Relation visuelle satisfaisante avec l'extérieur
- 231. Favoriser l'éclairage naturel
- 232. Complémentarité de l'éclairage artificiel
- 233. Confort olfactif

Hygiène et santé

- 234. Création des conditions d'hygiène
- 235. Facilitation du nettoyage et de l'évacuation des déchets d'activité
- 236. Facilitation des soins de santé
- 237. Gestion des risques de pollution de l'air par les produits de construction
- 238. Gestion des risques de pollution de l'air par les équipements
- 239. Gestion des risques de pollution de l'air par le radon
- 240. Gestion des risques d'air neuf pollué
- 241. Gestion du renouvellement d'air
- 242. Qualité de l'eau potable
- 243. Maintien et amélioration de la qualité de l'eau potable

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL

Notions de base

- 244. Le rayonnement solaire visible
- 245. Définition des grandeurs photométriques (1)
- 246. Définition des grandeurs photométriques (2)
- 247. Le facteur de lumière du jour
- 248. Les composantes de l'éclairage
- 249. La propagation de la lumière
- 250. Facteurs de transmission et de réflexion de différents matériaux

Perception visuelle et confort visuel

- 251. Le confort visuel et ses paramètres
- 252. Le confort visuel : le niveau d'éclairage
- 253. Le confort visuel : la distribution lumineuse
- 254. Le confort visuel : la relation au monde extérieur
- 255. Le confort visuel : le spectre lumineux
- 256. Le confort visuel : la limitation de l'éblouissement

Lumière naturelle

- 257. Disponibilité en lumière du jour
- 258. Définition des différents types de ciel
- 259. Éclairage naturel et différents types de ciel
- 260. Complémentarité éclairage naturel/thermique/acoustique

Ce qui influence l'éclairage naturel

- 261. Le ciel : incidence au cours de la journée, des saisons
- 262. Le site : coefficient de réflexion des parois extérieures
- 263. Le site : masques lointains
- 264. Le site : masques proches
- 265. Le local : proportions et dimensions
- 266. Le local : les couleurs et l'aménagement intérieur
- 267. Prise de jour : dimension, forme
- 268. Prise de jour : position, transparence

Moyens techniques et architecturaux

- 269. La forme du volume
- 270. Jouer sur les contrastes
- 271. L'éclairage unilatéral ou multilatéral - le second jour
- 272. L'éclairage zénithal
- 273. Le bandeau lumineux : principe et efficacité
- 274. Les réflecteurs et "lightshelves"
- 275. Les atria
- 276. Cours, patios et galeries
- 277. Puits de lumière
- 278. Les outils d'évaluation de l'éclairage naturel

Typologie et matériaux

- 279. Les parois transparentes
- 280. Les parois translucides (y compris l'isolation transparente)
- 281. Vitrages absorbants et réfléchissants
- 282. Les protections solaires : objectifs
- 283. Les protections solaires : choix de la technologie
- 284. Les protections solaires : les différents types

Techniques innovantes

- 285. Les conduits solaires
- 286. Les stores réfléchissants
- 287. Les systèmes directionnels
- 288. Les vitrages dynamiques

Le photovoltaïque : une technologie au service de l'éclairage naturel et artificiel

- 289. Éclairage artificiel : la contribution du photovoltaïque
- 290. Tamiser la lumière : les modules photovoltaïques translucides
- 291. Exemples d'une façade photovoltaïque translucide : la maison du tourisme et des Cévennes
- 292. Autres applications : brise-soleil et vitrages photovoltaïques semi-transparents

Lumière artificielle comme complément à la lumière naturelle

- 293. Les lampes (1)
- 294. Les lampes (2)
- 295. Les luminaires (1)
- 296. Les luminaires (2)
- 297. La complémentarité naturel-artificiel - zonage de l'éclairage artificiel
- 298. La complémentarité naturel-artificiel - régulation de l'éclairage artificiel
- 299. Les niveaux d'éclairage en fonction de l'activité et du type de local
- 300. La qualité de la lumière
- 301. Les différents systèmes d'éclairage

Typologies en fonction des usages

- 302. Bureaux
- 303. Logements
- 304. Hôpitaux
- 305. Écoles
- 306. Salles de sport
- 307. Halls industriels

AMÉNAGEMENT URBAIN ET DÉVELOPPEMENT DURABLE EN EUROPE

La ville contemporaine : évolution et questions

- 308. La croissance urbaine au xx^e siècle
- 309. Le tissu urbain : bâti, voirie, parcellaire
- 310. Ville, périphéries et territoire
- 311. Les réseaux de villes
- 312. La ville diffuse

Le développement durable : racines d'un concept pluridisciplinaire

- 313. Évolutionnisme et pensée urbaine (xix^e siècle)
- 314. Villes, pluridisciplinarité et écologie humaine (1920-1950)
- 315. Environnement et écologie urbaine (1970-1990)
- 316. Définition du "développement durable" (1987)
- 317. La "ville durable" : nature et culture réconciliées ? (1990-2000)

Les politiques environnementales

- 318. Le rapport Brundtland - les décisions mondiales
- 319. L'Agenda 21 au Sommet de Rio de Janeiro - les grands objectifs
- 320. Le développement durable dans l'Union européenne - les principes
- 321. Stratégie européenne pour le développement durable - les méthodes
- 322. Stratégie européenne pour le développement durable - les moyens
- 323. La charte d'Aalborg - les "villes durables"
- 324. Les Agendas 21 locaux - le développement urbain durable
- 325. La question des indicateurs du développement durable
- 326. Glossaire - quelques concepts du développement durable

Les modes d'action sur la ville

- 327. La politique urbaine - du gouvernement à la gouvernance
- 328. L'aménagement urbain - de la planification au "projet urbain"
- 329. Les plans locaux - renouvellement urbain et "ville compacte"
- 330. L'économie urbaine - partenariats, dynamique territoriale
- 331. Le développement social urbain - participation, concertation
- 332. Le génie urbain - infrastructures et réseaux techniques
- 333. Les nouvelles technologies - SIG
- 334. La démarche HQE²R : définition, cibles et objectifs
- 335. La méthodologie HQE²R de conduite de projet d'aménagement durable

- 336. Les outils de la méthodologie HQE²R
- 337. Les modèles d'évaluation de la démarche HQE²R

L'énergie renouvelable en milieu urbain

- 338. Les enjeux énergétiques
- 339. Les réseaux énergétiques : les réseaux de chaleur et de froid
- 340. L'énergie solaire thermique et photovoltaïque
- 341. Les énergies renouvelables et le bâtiment
- 342. L'énergie éolienne : conditions et limites

Gérer durablement l'urbanisation

- 343. Optimiser les usages du territoire
- 344. Réguler la consommation d'espace
- 345. Valoriser le végétal dans le paysage urbain
- 346. Diversifier les modes de transports
- 347. Agir sur les dynamiques sociales et la mobilité quotidienne
- 348. Rationaliser l'utilisation de l'énergie au niveau urbain
- 349. Approvisionnement et qualité de l'eau dans la ville
- 350. La lutte contre les déchets et les rejets
- 351. Formes alternatives de développement socio-économique
- 352. Démocratie locale
- 353. Chalon-sur-Saône (2001), exemple d'aménagement urbain durable
- 354. Louvain-la-Neuve (1972), du développement durable avant la lettre ?

Pour un urbanisme climatique

- 355. Aménagement urbain et environnement
- 356. Les données générales : climat, topographie, végétation
- 357. Urbanisation climatique passive : l'implantation des villages
- 358. Le milieu urbain : des caractères climatiques spécifiques
- 359. Les effets du vent en milieu urbain
- 360. Formes urbaines, orientation des voies et gabarits
- 361. Les microclimats urbains : création passive/active
- 362. L'urbanisme en climats chauds : spécificités et exemples

Optimiser l'énergie dans la ville

- 363. Planification énergétique urbaine
- 364. Valorisation des énergies locales
- 365. Pollution de l'air
- 366. Les moyens de transport économes et propres
- 367. Les microaménagements
- 368. Le mobilier urbain

CONNAÎTRE LES BASES CONSTRUIRE AVEC LE CLIMAT

- *The climatic dwelling: an introduction to climate-responsive residential architecture*, EC - DG XII, James & James Ltd., 1996.
- La collection des revues *Systèmes Solaires*, 146 rue de l'Université, 75007 Paris.
- *Manuel de conception: Architecture solaire passive pour la région méditerranéenne*, Centre commun de recherche, CE - DG XVII, 1995.
- *Hélios, concours pour une architecture solaire passive*, ministère de la Région wallonne, Namur 1995.
- *Architecture climatique, une contribution au développement durable*, Pierre Lavigne, Édisud, 1994.
- *Daylighting in buildings, a thermie programme action*, EC - DGXVII, 1994.
- *Guide des énergies renouvelables*, ministère de la Région wallonne - APERE, Bruxelles, 1994.
- *Le manuel du responsable énergie, L'utilisation rationnelle de l'énergie dans le tertiaire*, A. De Herde, ministère de la Région wallonne, Architecture et Climat, UCL, Institut wallon, 1994.
- *L'espace de la véranda*, Recherches n° 1^{bis}, Cité - Services, ministère du Logement, 1994.
- *Architectures d'été: construire pour le confort d'été*, Jean-Louis Izard, Édisud, 1993.
- *Éclairage, éléments d'éclairagisme*, Programme d'action Ravel édité par l'Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne 1993.
- *Photovoltaik und Architektur*, O. Humm, P. Toggweiler, Birkhäuser verlag, 1993.
- *Transparent insulation technology*, ETSU-OPET for the Commission of the EC, DG XVII, 1993.
- *À la recherche des ambiances*, Comité d'Action pour le Solaire (Observ'ER), 1992.
- *Energy conscious design, a primer for architects*, Commission of the EC, Architecture et Climat, Batsford, London 1992.
- *Energy in architecture, the european passive solar handbook*, Batsford for the Commission of the EC, 1992.
- *Le climat de la terre, un passé pour quel avenir?*, A. Berger, De Boeck université, Bruxelles, 1992.
- *Architectures solaires en Europe: conceptions, performances, usages*, Commission des CE, Édisud, 1991.
- *Du neuf sous le soleil*, Alain Liébard, Cédric Philibert, Michel Rodot, Calmann-Lévy/Systèmes Solaires, 1991.
- *Le soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment*, Société suisse des ingénieurs et architectes, D 056, 1990.
- *Maisons solaires maisons d'aujourd'hui, Guide régional des maisons solaires*, Comité d'Action pour le Solaire (Observ'ER), Paris, 1990.
- *Arquitectura solar, aspectos pasivos, bioclimatismo e iluminacion natural*, G. Yanez, Monografias de la Direccion General para la Vivienda y Arquitectura, Madrid, 1988.
- *Conception thermique de l'habitat, Guide pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, SOL.A.I.R., Édisud 1988.
- *Guide d'aide à la conception bioclimatique*, RD Énergie, Architecture et Climat, SPPS Bruxelles, 1986.
- *Manuel pratique du génie climatique*, Recknagel, Sprenger, Hönman, PYC Editions, Paris, 1986.
- *Atlas européen du rayonnement solaire*, volumes I et II, Commission des CE, Bruxelles, 1984.
- *Chauffage de l'habitat et énergie solaire*, tomes I et II, Thierry Cabirol, Daniel Fauré, Daniel Roux, Édisud, 1984.
- *Calcul des planchers solaires directs*, D. Roux, D. Mandineau, M. Chateauminois, Collection de l'École supérieure d'ingénieurs de Marseille, Édisud, 1983.
- *5000 maisons solaires*, ministère de l'Urbanisme et du Logement, Agence française pour la maîtrise de l'énergie, Éditions du Moniteur, 1983.
- *Architectures et climats: soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, G. et J.-M. Alexandroff, Berger-Levrault, 1982.
- *Atlas solaire français, Énergie transmise et calcul de l'effet de masques*, P. Claux, R. Gilles, A. Pessa, M. Raoust, Pyc Édition, 1982.
- *Constructions solaires passives 50 réalisations françaises*, Éditions Apogée, 1982.
- *Architecture et volupté thermique*, L. Heschong, Éditions Parenthèses, 1981.
- *Guide de la maison bioclimatique*, Alexandroff et Liébard Architectes, Groupe Racine, 1981.
- *Maisons solaires premiers bilans*, J.-P. Ménard, Éditions du Moniteur, 1980.
- *L'habitat solaire: comment?*, G. Alexandroff, A. Liébard, L'Équerre, Paris, 1979 (disponible uniquement auprès de l'Observatoire des Énergies Renouvelables).
- *Soleil, nature, architecture*, D. Wright, Éd. Parenthèses, 1979.
- *1 maison solaire 30 solutions*, A. Garnier, Éd. Georgi, 1979.
- *Année type moyenne*, Institut royal météorologique de Belgique, Série B n° 45, Bruxelles, 1978.
- *L'homme, l'architecture et le climat*, B. Givoni, Éditions du Moniteur, Paris 1978.
- *The solar home book, heating, cooling and designing with the sun*, Bruce Anderson, Cheshire Books, 1976.
- *Thermal Comfort, Analysis and application in environmental engineering*, P.O. Fanger, McGraw-Hill, 1972.
- *Climatologie*, P. Estienne et A. Godart, Coll. U Armand Colin, Paris, 1970.
- www.rt2000.fr
- "Réglementation thermique 2000" (version 2004) *CSTB Magazine* n° 132, novembre-décembre 2000.

CONSTRUIRE EN CLIMATS CHAUDS

- *Les ambiances architecturales et urbaines*, Adolf L., Augoyard J.-F., Peneau J.-P., 1998. *Cahiers de la recherche architecturale* n° 42/43. Éd. Parenthèses, Marseille.
- *Architectures et climats*, Alexandroff G. et J.-M., 1982. Éd. Berger-Levrault, Paris.
- *Daylighting in architecture*, Commission of the EC DG XII for Science Research and Development, Baker N., Fanchiotti A.,

- Stemers K., 1993. Ed. James and James Ltd, London.
- *Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide*, Barnaud G., Gandemer J., Millet J.-R., Sacre C., 1997. Tome I, *Méthodologie*. CSTB, Paris.
 - *Ventilation naturelle des bâtiments collectifs dans les départements d'Outre-Mer: influences de la forme et de la composition de l'habitat*, Bonneaud F., 1998. DEA en ambiances architecturales et urbaines. CSTB/Cerma & Cresson - UMR CNRS, Nantes.
 - *Label Ecodom: opération expérimentale, prescriptions techniques, document de référence*, Célaire R., Jourdan O., 1997. EDF, Promotelec.
 - *Architecture climatique: une contribution au développement durable*, Châtelet A., Fernandez P., Lavigne P., 1998. Tome II, *Concepts et dispositifs*, Édisud, Aix-en-Provence.
 - *Bioclimatisme en zone tropicale*, Célaire R., Huet O., 1986. Groupe de recherche et d'échanges technologiques, Paris.
 - *L'architecture tropicale*, Dequeker P., Kanene C., 1992. Centre de recherches pédagogiques, Kinshasa.
 - *Élaboration d'un système expert d'aide à l'intégration de la problématique du vent au niveau du piéton dans la conception architecturale*, De Clercq M., 2000. Travail de fin d'études - Département Architecture, Université catholique de Louvain.
 - *Passive and low energy architecture*, Docherty M., Szokolay V., 1999. The University of Queensland.
 - *L'homme, l'architecture et le climat*, Givoni B., 1978. Éd. du Moniteur, Paris.
 - *Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide*, Gandemer J., Barnaud G., Millet J.-R., Sacre C., 1992. Tome I: *Méthodologie climatique dans l'habitat et conseils pratiques*. CSTB, Nantes.
 - *Palais et maison du Caire*, Garcin J.-C., Maury B., Revault J., Zakariya M., 1982. Vol. I, *Époque Mamelouke (XIII^e - XV^e siècles)*. Éd. du CNRS, Paris.
 - *Archi-bio*. Izard J.-L., 1979. Éd. Parenthèses, Marseille.
 - *Aménager Outre-Mer: approches environnementales*, Lefeuvre M., 1998. Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, direction générale de l'Urbanisme de l'Habitat et de la Construction.
 - *Les énergies renouvelables: outils locaux de développement*, Liébard A., 1974. UP6 - École d'architecture, Paris.
 - *Prise en compte des phénomènes climatiques naturels pour la valorisation de l'habitat en zone tropicale sèche*, Liébard A., 1980. Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie, Paris.
 - *L'habitat groupé en zone tropicale sèche*, Liébard A., 1981. Recherches françaises et habitat du Tiers-Monde, Paris.
 - *Development of solar energy in building - Construction in Lesotho*, Liébard A., 1984. Programme des Nations unies pour le développement.
 - *Caractérisation et développements aérodynamiques de l'espace intermédiaire en climat tropical humide: conception d'une architecture de confort adaptée à la contrainte cyclonique*, Moreau S., 1999. Thèse de doctorat. CSTB, Nantes.
 - *Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide*, Pignolet-Tardan F., 1996. Thèse de doctorat. Institut des sciences appliquées, Lyon.
 - *Guide à l'utilisation de l'éclairage naturel*, Reiter S., De Herde A., Boisdenghien M., 2000. Architecture et Climat. Ministère de la Région wallonne.
 - *Construire parasismique*, Zaeek M., 1996. Éd. Parenthèses, Marseille.
 - *Climatiser un local, Choisir une protection solaire*, 1997. Architecture et Climat. Ministère de la Région wallonne.
- ### CONSTRUIRE AVEC LE DÉVELOPPEMENT DURABLE
- "Les énergies renouvelables: histoire, état des lieux et perspectives", Jean-Christian Lhomme. Delachaux et Niestlé/*Systèmes Solaires*, 2002.
 - "Peurs et menaces nouvelles", *Manière de voir* n° 59, sept.-oct. 2001.
 - *Légionelles*, CSTB, RISE, cahier 3339, Paris, mai 2001.
 - *Un manifeste pour la démarche HQE*, Gilles Olive. Diffusé aux premières assises de la démarche HQE à Bordeaux, nov. 2001.
 - "Péril en la demeure", I. Nadeau, *Environnement Magazine* n° 1595, mars 2001.
 - *La HQE en 21 questions/réponses*, Électricité de France, Paris, mars 2001.
 - "Comment lutter contre les légionelles dans le bâtiment", F. Sagot, *Le Moniteur* n° 5071, Paris, février 2001.
 - *Qualité Environnementale des bâtiments, Projet final*, Ademe, Paris, version février 2001.
 - *Habitats Solaires d'Europe* (vidéo), Observ'ER, janvier 2001.
 - *Économiser l'énergie et l'eau à la maison: c'est facile*, Agence locale de l'énergie de l'agglomération grenobloise, AGEDEN, Grenoble, 2001.
 - *L'éclairage naturel des bâtiments*, Architecture et Climat (UCL), André De Herde, Sigrid Reiter, ministère de la Région wallonne (DGTRE), Louvain-la-Neuve, 2001.
 - *Éclairage industriel*, Syndicat de l'éclairage, Ademe, Paris, 2001.
 - *Égo. Pour une sociologie de l'individu*, Jean-Claude Kaufmann. Nathan, Paris, 2001.
 - *L'architecture écologique*, Dominique Gauzin-Müller, Le Moniteur, Paris, 2001.
 - *Changement climatique: un défi majeur*, Ademe, mission interministérielle de l'Effet de serre, Paris, décembre 2000.
 - *Le guide de la maison économe*, Ademe, Paris, octobre 2000.
 - *Guide Eau chaude, Guide Chauffage, Guide Climatisation*, Électricité de France, Paris, septembre 2000.
 - *L'air sous surveillance*, Fédération Atmo, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Amiens, septembre 2000.
 - *Formation Haute Qualité Environnementale*, Institut Éco-conseil, Alsace Qualité Environnement, Centre international de formation en architecture et aménagement, Strasbourg, juin-sept.2000.
 - *Chauffage au bois, L'éclairage: confort et économie, c'est*

- possible, *Guide pratique pour l'habitat*, Ademe, Paris, août 2000.
- *Surveillance de la qualité de l'air*, Ademe, Réseau national de surveillance et d'information sur l'air, Paris, juillet 2000.
 - *Déplacements urbains*, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Ademe, Paris, juillet 2000.
 - *Le chauffe-eau solaire individuel*, Ademe, Paris, avril 2000.
 - *Bâtir avec l'environnement*, CSTB, PUCA, Association HQE, actes du colloque du 9 mars 1999, Paris, mars 2000.
 - *Pour une approche commune de la Haute Qualité Environnementale en Franche-Comté*, Ademe, conseil régional de Franche-Comté, AJENA, Lons-le-Saunier, 2000.
 - *Bien-être et santé dans les constructions*, FFB, CSTB, Ademe. Mémento à l'usage des entreprises, Paris, 2000.
 - *Solar combisystems*, Jean-Marc Suter, Thomas Letz, Werner Weiss, Jürg Inäbnit, IEA SHC-TASK 26, 2000.
 - *Les cahiers de la confédération construction wallonne*, Environnement et construction, 2000.
 - *Écoumène, Introduction à l'étude des milieux humains*, Augustin Berque, Belin, Paris, 2000.
 - *Gestion énergétique dans les bâtiments publics*, Ademe, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement. Guide méthodologique, Paris, déc. 1999.
 - *Les éconocroc' au quotidien*, Ademe, délégation régionale Bretagne, Rennes, juin 1999.
 - *Déchets des ménages*, Ademe, Paris, mai 1999.
 - *Géothermie basse et très basse énergie*, Observ'ER, Ademe, Paris, mars 1999.
 - *ATEQUE: 5 ans de travaux (1993-1998)*, Gilles Olive, Plan urbanisme construction architecture, Éd. CSTB, Paris, mars 1999.
 - *Bâtir avec l'environnement*, P. Maes, C. François, PUCA, Éd. CSTB, mars 1999.
 - *Radon: guide technique*, Office fédéral de la santé publique, Berne, mars 1999.
 - *Le radon dans les habitations*, CSTC. Note d'information technique 211, Bruxelles, mars 1999.
 - *Innovation énergie développement, quatre outils français d'analyse de la qualité environnementale des bâtiments*, CSTB. Plan construction et architecture, Éd. CSTB, Paris, mars 1999.
 - *L'habitat écologique: quels matériaux choisir?*, F. Kur, Terre vivante, Mèze, février 1999.
 - *Guide d'aide à l'utilisation de l'éclairage artificiel en complément de l'éclairage naturel*, Architecture et Climat (UCL), A. De Herde, M. Bodart, ministère de la Région wallonne (DGTRE), Louvain-la-Neuve, 1999.
 - *Construire pour l'avenir*, Énergie 2000 Construction durable. Diffusion: Société suisse pour la protection de l'environnement, Genève, 1999.
 - *Des indicateurs pour projeter un développement durable*, E. Dufresnes. Master européen en architecture et développement durable, École polytechnique fédérale, Lausanne, 1999.
 - *Intégrer la qualité environnementale dans les constructions publiques*, mission interministérielle pour la Qualité des constructions publiques, Association HQE.
 - Plan construction architecture, CSTB, Paris, 1999.
 - *Éco-logis, la maison à vivre*, Öko-Test, adaptation française par Terre vivante, en collaboration avec Maxime Tassin, Éd. Könemann, Cologne, 1999.
 - *Duurzame Architectuur*, Nederlands Architectuur Instituut, Éd. Melet, 1999.
 - *Savoir construire éco-logique-nomique*, H.R. Preisig, W. Dubach, U. Kasser, K. Viriden. Werd Verlag, CRB, Zürcher Hochschule Winterthur, Zurich, 1999.
 - *Pour que la terre reste humaine*, Robert Barrault, Dominique Bourg, Nicolas Hulot. Coll. Points, Éd. du Seuil, 1999.
 - *Bâtiment et Haute Qualité Environnementale*, Alsace Qualité Environnement, Strasbourg, 1999.
 - *Bâtir avec l'environnement: bilan 1992-1999 et perspectives*, Brigitte Hyks, FFB, Paris, 1999.
 - *Bauart Architekten*, Swiss Federal Statistic Office Building. Présentation du projet au Green Building Challenge 98, Vancouver, octobre 1998.
 - *Ecological aspects of building*, H.R. Preisig, K. Viriden, Société suisse des ingénieurs et des architectes, document D 0122, Zürich, septembre 1998.
 - *La circulation*, Arene Île-de-France, conseil régional Île-de-France, Paris, septembre 1998.
 - *Les déchets, L'eau*, Arene, Paris, mars 1998.
 - *Le soleil, source d'énergie*, Énergie 2000, Berne, janvier 1998.
 - *Guide des déchets de chantier de bâtiment*, Ademe, Paris, janvier 1998.
 - *Guide pour l'élaboration du cahier des charges environnemental pour la construction d'un lycée*, CSTB, Gilles Olive, Paris, 1998.
 - *Évaluation de la qualité environnementale des bâtiments*, P. Duchene-Marullaz, S. Nibel, L. Le Quintrec, N. Chatagnon. Plan construction et architecture, Éd. CSTB, Paris, 1998.
 - *Économiser l'énergie, Guide pour la construction, la rénovation et l'habitat*, Greenpeace Belgium, Bruxelles, 1998.
 - *Vivre ou survivre*, Institut royal des sciences naturelles de Belgique, P. Corten-Gualtieri, P. Van Haver, W. De Jonge, E. Zaccai, Bruxelles, 1998.
 - *Le mythe de l'individu*, M. Benasayag, La Découverte, Paris, 1998.
 - *La ventilation à la demande*, P. Wouters, D. Ducarme, C. Delmotte, J. Claessens, Région wallonne, Namur, 1998.
 - *De duurzame stad*, J. Brouwers, E. Harms, J. Juffermans, W. Koetsenruijter, H. Perebooms, De Kleine Aarde, Éd. Aeneas, 1998.
 - *Facteur 4*, Ernst U von Weizsäcker, Amory B Lovins, L. Hunter Lovins. Rapport du Club de Rome, Éd. Terre vivante, Mens, 1997.
 - *Guide Éclairage*, Électricité de France, Paris, décembre 1997.
 - *L'homme et sa santé en relation avec son environnement et son habitat dans l'approche du développement durable*, M. Van Raemdonck. Master européen en architecture et développement durable, École polytechnique fédérale, Lausanne, juillet 1997.
 - *L'air*, Arene Île-de-France, conseil régional Île-de-France, Paris, juin 1997.
 - *Mieux vivre et mieux bâtir avec l'environnement*, Alsace

- Qualité Environnement. Forum du 28 novembre 1997, Strasbourg, 1997.
- *Habitat Qualité Santé*, Drs Déoux, Éd. Medieco, Andorre, 1997.
 - *Un monde sans limite, Essai pour une clinique psychanalytique du social*, J.-P. Lebrun, Eres, Toulouse, 1997.
 - *Enfin chez soi... réhabilitation de préfabriqués*, Atelier Lucien Kroll, Éd. L'Harmattan et WoGeHe, Paris et Berlin, oct. 1996.
 - *Handbook of sustainable building*, D. Anink, C. Boonstra, J. Mak, Éd. James & James, Londres, avril 1996.
 - *Guide de l'architecte pour la conception d'immeubles de bureaux en fonction du développement durable*, R. Cole, A. Auger, Travaux publics et services gouvernementaux du Canada, 1996.
 - *Villes durables européennes*, Commission européenne, groupe d'experts sur l'environnement urbain, Luxembourg, 1996.
 - *Guide d'aide à la rénovation bioclimatique*, B. Collard, A. Nihoul, A. De Herde, N. Lesens, ministère de la Région wallonne, 1996.
 - *Participation et architecture*, Adriana Rabinovich Behrend, thèse 1514, École polytechnique fédérale de Lausanne, 1996.
 - *The ecology of architecture*, L.C. Zeiher, Éd. Watson-Guption Publications, New York, 1996.
 - *Être humains sur la terre*, A. Berque, coll. Le débat, Gallimard, Paris, 1996.
 - *Les droits des générations futures*, Conseil national du développement durable, actes de la conférence du 8 mai 1996, Bruxelles, 1996.
 - "Architecture et défi écologique", *Archicréé* n° 268, Paris, oct.-nov. 1995.
 - *Programmer la qualité environnementale d'une construction*, I. Hurpy, P. Lefèvre, H. Pénicaut. Plan construction architecture, ministère du Logement, octobre 1995.
 - *Le bâtiment face aux défis de l'environnement*, plan construction et architecture, Blenheim Construction, actes du colloque du 16 mai 1995, Recherches n° 68, Éd. CSTB, Paris, septembre 1995.
 - *Régulation, Chauffage*, Ademe, Paris, janvier 1995.
 - *Pour un habitat soutenable*, Europe et Environnement, actes du colloque des 7 et 8 avril 1995, Strasbourg, 1995.
 - *Les bureaux "verts"*, Jean-François Roger France, institut supérieur d'architecture Saint-Luc, Bruxelles, 1995.
 - *Passive low energy innovative architectural design*, A. De Herde, P. Wouters, M. Machiels, Architecture et Climat (UCL), Louvain-la-Neuve, septembre 1994.
 - *Effet de serre*, Paris, Ademe, septembre 1994.
 - *La planète Terre entre nos mains*, S. Antoine, M. Barrère, G. Verbrugge, La Documentation française, Paris, 1994.
 - *Le manuel du responsable énergie*, A. De Herde, ministère de la Région wallonne, 1994.
 - *Bureaux Programmer Concevoir Gérer*, Ademe, Association des ingénieurs en climatic, ventilation et froid, PYC Édition, Paris, 1993.
 - *Plancher chauffant*, Ademe, COCHEBAT, Paris, déc. 1992.
 - *Économiser l'énergie*, ministère de la Région wallonne, direction générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie, Namur, 1992.
 - *Non-lieux, Introduction à une anthropologie de la surmodernité*, Marc Augé, le Seuil, Paris, 1992.
 - *Du neuf sous le soleil*, Alain Liébard, Cédric Philibert, Michel Rodot, Éd. Calman-Lévy/Systèmes Solaires, 1991.
 - *Une maison saine*, A. De Boeck, M. De Preeuw, E. Hoeckx, A. Knegetel, A. Legein, H. Vanderstadt, P. Warmenbol, R. Wellens, Éd. Association pour la santé dans la construction et l'habitat, Anvers, 1990.
 - *L'homme et la terre*, Éric Dardel, Éd. du Comité des travaux historiques et scientifiques, Paris, réimp. 1990.
 - *Médiancé. De milieux en paysages*, Augustin Berque, Montpellier, G.I.P. Reclus, 1990.
 - *Penser l'habité*, E. Boucher, J. Rooney-Duval in Monique Eleb-Vidal, A.-M. Châtelet, Th. Mandoul, Éd. P. Mardaga, 1988.
 - *Les recherches sur la perception*, Maturana, Varela, 1980.
 - *Les modèles d'écologie urbaine*, Duvigneaud, 1979.
 - *Richelieu, ville nouvelle - Essai d'architecturologie*, Dunod, Paris, 1978.
 - *La théorie générale des systèmes*, L. von Bertalanffy, 1973.
 - *Les logiques de communication*, Watzlawick, 1972.
 - *Sur l'espace architectural - Essai d'épistémologie de l'architecture*, Boudon, Philippe, Dunod, Paris, 1971.
 - *Le geste et la parole - Technique et langage*, Leroi-Gourhan, André, Albin Michel, Paris, 1964.
 - *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*, Victor Olgyay, New Jersey, 1963.
 - *Logos? Labels? Pictogrammes?*, Réseau Éco-consommation, Charleroi.
 - "Bâtir, habiter, penser", extrait de *Chemins qui ne mènent nulle part*, Martin Heidegger, Gallimard, Paris.

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL

- *Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique*, Bodart M., thèse de doctorat, faculté des sciences appliquées, UCL, Belgique, 2002.
- *Site layout planning for daylight and sunlight: a guide to good practice*, Littlefair P.J., Building Research Establishment Report 209, 1991.
- *Recommandations relatives à l'éclairage intérieur des lieux de travail*, Association française de l'éclairage, Lux, France, 1993.
- *Brightness management*, Zumtobel, Zumtobel licht, 1995.
- *Daylight in architecture: a european reference book*, Baker N., Fanchiotti A., Steemers K., European Commission, James and James, UK, 1993.
- "Isolation acoustique des fenêtres, 1^{re} partie: performance acoustique du vitrage", Ingelaere B., *CSTC Magazine*, p. 24-33, 2^e trimestre 1998.
- *Daylight design of buildings*, Baker N., Steemers K.,

- European Commission, James and James, London, 2002.
- *Daylight performance of buildings*, Fontoynt M., European Commission, James and James, London, 1999.
 - *Daylight in buildings: a source book on daylighting systems and components*, IEA SHC 21/ECBCS Annex 29 report book number LBNL - 47493, 2000.
 - *The LT method 2.0: an energy design tool for non-domestic buildings*, Baker N., Steemers K., Cambridge Architectural Research Ltd and The Martin Center for Architectural and Urban Studies, University of Cambridge.
 - *Estimating daylight in buildings: Part 1*, BRE report 309, 1986.
 - *ADELIN 3: Lighting design and analysis tool*, IEA SHC 21/ECBCS Annex 29.
 - *Memento*, Saint-Gobain Glass, 2000.
 - *Solar energy in building renovation: solar collectors, glazed balconies and transparent insulation*, IEA SHC 20, James and James, London, 1997.
 - *Solar energy houses: strategies, technologies, examples*, IEASHC 13 book, James and James, London, 1997.
 - *Daylighting*, Majoros A., Passive low energy architecture international, design tools and techniques note 4, Brisbane, 1998.
 - "Composants électro-actifs innovants", Quenard D., dossier Batimat, CSTB Magazine n° 126, CSTB, nov.-déc.1999.
 - *Guide de rédaction du cahier des charges techniques des générateurs photovoltaïques connectés au réseau*, Cahiers techniques, Ademe, août 2002.
 - *Matériaux et procédés pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire*, Cahiers techniques, Ademe, sept. 2001.
 - *Photovoltaics in buildings*, International Energy Agency, James and James, 1996.
 - *Les applications de l'électricité solaire photovoltaïque*, Cahiers techniques, Ademe, juillet 2001.
 - *Guide d'aide à l'utilisation de l'éclairage artificiel en complément à l'éclairage naturel*, Bodart M., De Herde A., ministère de la Région wallonne, 1999.
 - *CD-Rom Énergie + version 2: réduire les consommations électriques*, Architecture et Climat, ministère de la Région wallonne, 2001.
 - *Lighting controls and daylighting use*, BRE digest 272, Watford, 1983.
 - *Lighting of indoor work places*, Commission internationale de l'éclairage, International Standard ISO 8995, CIES 008/E, 2002.
 - "Lighting quality - this is (about) the way it happened", McGowan T., *Proceedings of the first CIE symposium on Lighting Quality* (1998, Ottawa, Canada), p. 60-65, 1998.
 - *Determinants of lighting quality I: state of the science*, Veitch J., Newshman G., Proceedings of the annual Conference of the Illuminating Engineering Society of North America, (1996, Cleveland, USA), 1996.
 - *Determinants of lighting quality II: research and recommendations*, Veitch J., Newshman G., Annual Convention of the American Psychological Association, (1996, Toronto, Canada), 1996.
 - "View through window may influence recovery from surgery", Ulricht R. S., *Science* 224, p. 420-421, 1984.
 - *Lighting for hospitals and health care facilities*, Illuminating Engineering Society of North America, IESNE RP-29-95, New-York, 1995.
 - *Design of educational buildings: 1 Primer*, Yannas S., European Commission, DG XII for Science, Research and Development, E. G. Bond, London, 1994.
 - *Lighting for sport halls*, Commission internationale de l'éclairage, publication CIE n° 58, Paris, 1983.
 - *Daylighting for sports halls, two cases studies*, The Department of the Environment's Energy Efficiency Best Practice programme, General Information report 35, 1997.
 - *Daylighting, design and analysis*, Robbins C.L., Van Nostrand Reinhold Company, New-York, 1986.
 - "Tips for daylighting with windows", O'Connor J., *Lawrence Berkeley National Laboratory Publication n° 790*, Berkeley.
- ### AMÉNAGEMENT URBAIN ET DÉVELOPPEMENT DURABLE EN EUROPE
- *L'atlas des Franciliens*, tome I, *Territoire et population*, Paris, IAURIF, 2000.
 - *La ville globale*, Saskia Sassen, Paris, Éditions Descartes, 1996.
 - *Le territoire comme palimpseste et autres essais*, A. Corboz, Éditions de l'Imprimeur.
 - *Analyse urbaine*, Ph. Panerai, J.-Ch. Depaule, M. Demorgon, Marseille, Parenthèses.
 - *Metropolis unbound*, Robert Fishman, Flux n° 1, 1990.
 - *Schéma directeur de l'Île-de-France*, Direction de l'Équipement, 1991.
 - *La ville et ses territoires*, M. Roncayolo, Paris, Gallimard, 1990.
 - *Faire société*, Jacques Donzelot, Paris, Seuil, 2002.
 - *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Walter Christaller, Iena, G. Fisher, 1933.
 - *L'urbain sans lieu ni bornes* (préf. de Fr. Choay), Melvin M. Webber, Éditions de l'Aube, 1996.
 - *Le travail sans qualité: les conséquences humaines de la flexibilité*, Richard Sennett, Paris, Albin Michel, 2000.
 - "Généalogie urbaine d'un village du Brabant: pour une histoire diffuse de la grande ville", Bénédicte Grosjean, *Le Visiteur* n° 10, printemps 2003.
 - *La rurbanisation ou la ville éparpillée*, G. Bauer, J.-M. Roux, Paris, Seuil, 1976.
 - "Milano, ad esempio", B. Secchi, C. Bianchetti, *Casabell* n° 596, déc.1992.
 - *The evolution of cities*, É. Reclus, Contemporary Review, fév. 1895.
 - *Cities in evolution*, P. Geddes, Londres, Williams & Norgate, 1915.
 - *L'évolution des villes, Introduction à l'urbanisme*, Marcel Poète, Paris, Boivin, 1929.
 - *Les annales d'histoire économique et sociale*, M. Bloch et L. Fèbvre, 1929.
 - *L'école de Chicago: naissance de l'écologie urbaine*, Isaac

- Joseph, Yves Grafmeyer, Paris, Éd. du Champ Urbain, 1979.
- *The city as natural phenomenon*, Robert E. Park, Human Communities, New York, Free Press, 1952.
 - "Manifeste pour l'écologie urbaine", C. Garnier, P. Mirenowicz, *Metropolis* n° 64-65, 1984.
 - *L'écologie urbaine et l'urbanisme*, V. Berdoulay, O. Soubeyran, Paris, La Découverte, 2002.
 - "Les impératifs du développement durable", R. Passet, *Bulletin de la CPAU* (Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme) n° 37, novembre 2001.
 - *Le contrat naturel*, M. Serres, Paris, Éd. François Bourin, 1990.
 - *Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie*, Bruno Latour, Paris, La Découverte, 1999.
 - *Notre avenir à tous* (rap. Brundtland), Commission mondiale sur l'environnement et le développement, Montréal, Éd. du Fleuve, 1988.
 - "Après Rio, quelles stratégies?", Ivo Rens, revue *Sebes* (Stratégies énergétiques, biosphère et société), Genève, 1992.
 - "Le cadre juridique du développement durable", S. Charbonneau, *Bulletin de la CPAU* (Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme) n° 37, oct. 2001.
 - *Guide pratique pour les stratégies de développement durable*, OCDE, 2001.
 - "Les contradictions de la ville durable", Développement durable, villes et territoires - Innover et décloisonner pour anticiper les ruptures, J. Theys, C. Emelianoff. Note n° 13 du Centre de prospective et de veille scientifique, DRAST, avril 2000.
 - *Villes et développement durable. Des expériences à échanger*, Paris, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, juin 1998.
 - *Développement urbain durable. Quatre métropoles européennes*, R. Camagni, M. C. Gibelli, La Tour-d'Aigues, Éd. de l'Aube, 1997.
 - *La ville et l'environnement. 21 expériences à travers le monde*, Institut national du génie urbain, Bernard Ascher et Dominique Drouet (coord.), Paris, Polytechnica, 1994.
 - *L'urbanisme à pensée faible ou l'imaginaire aménageur postmoderne*, L'invention de la ville, Y. Chalas, Paris, Éditions Economica-Anthropos, 2000.
 - *La condition postmoderne : rapport sur le savoir*, J.-F. Lyotard, Paris, Éditions de Minuit, 1979.
 - *Le gouvernement des villes institue autant qu'il coordonne ou les limites des théories de la gouvernance*, La ville éclatée, A. Bourdin, La Tour-d'Aigues, Éd. de l'Aube, 1998.
 - *Re-constructions*, Bernard Huet. Projet urbain n° 16, avril 1999.
 - *Projet urbain*, P. Panerai, D. Mangin, Marseille, Parenthèses, 1999.
 - "L'intellectuel, la mégalopole et le projet urbain", *Les nouvelles conditions du projet urbain. Critique et méthodes*. Alain Charre, Liège, Mardaga, 2001.
 - "Crise de l'aménagement et transformations des temporalités de l'action publique", Y. Janvier. *La ville éclatée*, N. May et al., La Tour-d'Aigues, Éd. de l'Aube, 1998.
 - *Le projet d'aménagement et de développement durable du PLU*, CERTU, référence n° 24, DGUHC, ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, avril 2002.
 - *Paris ville invisible*, B. Latour, É. Hermant, La Découverte, 1998.
 - *La ville et l'enjeu du "développement durable"*, Marc Sauvez, rapport au ministre de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, La Documentation française, 2001.
 - "Démarche et outils pour intégrer le développement durable", C. Charlot-Valdieu, Ph. Outrequin, *Développement durable : HQE²R*, cahier n° 1, tome I, Éd. du CSTB, 2004.
 - "Maîtriser l'énergie pour un monde équitable", J.-P. Déléage, revue *Sebes*, Genève, 1992.
 - *Vues sur la ville*, B. Bochet, G. Pini, Observatoire universitaire de la ville et du développement durable, Institut de géographie de Lausanne, 2002.
 - *La Plaine-Saint-Denis, un projet radicalement simple*. Projet urbain n° 15, 1998.
 - *Campagnes urbaines*, Pierre Donadieu, Actes Sud/ENSP, 1998.
 - *Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ?*, V. Kaufman, C. Jemelin et J.-M. Guidez, La Documentation française, 2001.
 - "Du développement durable à la ville durable, le récit du passage", P. Agha, *Bulletin de la CPAU* (Conférence permanente sur l'aménagement et l'urbanisme), nov. 2001.
 - "Louvain-la-Neuve, un cas de figure", J. Rémy, D. Bodson, L. Boulet, *Les cahiers de l'urbanisme* n° 33, ministère de la Région wallonne, mars 2001.
 - "Invention et tradition : Louvain-la-Neuve", Ch. Gilot, UCL, *Vie et mémoire d'une institution*, Bruxelles, La Renaissance du livre, 1993.
 - "Bioclimatic performance of morphological parameters in the peripheral settlement in Brasilia", M. Adriana, B. Romero, *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA'98 in Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998.
 - *The urban climate*, H. E. Landsberg, chap. 2, Mesoclimate, Londres, Acad. Press, 1981.
 - *Décider avec le climat*, conseil général des Deux-Sèvres, sans date.
 - "Living with the city : urban design and environmental sustainability", S. Yannas, *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA'98, Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998.
 - *Manuel de conception - architecture solaire passive pour la région méditerranéenne*, Unité interaction énergie environnement, centre commun de Recherche et direction générale de l'Énergie, sans date.
 - "Environmental criteria and design principles for a new community in Brasilia", Marcio Villas Boas, *Environmentally Friendly Cities*, Proceedings of PLEA'98, Lisbon, James and James Sciences Publishers Ltd., 1998.
 - "Le mobilier public", J.-S. Balthasart, *Les cahiers de l'urbanisme* n° 27, direction générale de l'Aménagement du territoire de la région wallonne, décembre 1999.
 - *Rapport 2002-2003 de l'Apheis - Air pollution and health, a european information system*, 2004.

CONNAÎTRE LES BASES

22: Architectures d'été, construire pour le confort d'été, J.-L. Izard / 23 : Documentation St-Roch / 24.2.1 : À la recherche des ambiances, R. Delacloche / 24.2.2 : Systèmes Solaires n° 112 / 25, 26 : Architectures d'été, construire pour le confort d'été, J.-L. Izard / 31 : Maisons solaires maisons d'aujourd'hui, Guide régional des réalisations, Comité d'Action pour le Solaire / 32 : Architecture islamique en Espagne, Taschen / 37 : Documentation CoSTIC / 38 : Design of educational buildings, S. Yannas / 41 : Documentation Aralco / 42 : Documentation ATC / 48.1: A + U Publishing, L. Kahn / 48.2.1 : Systèmes Solaires n° 101, J. Bouillot / 48.2.2 : Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 48.2.4 : Systèmes Solaires n° 101, Bermond-Pochon / 49 : À la recherche des ambiances, R. Delacloche / 50 : Häuser, 6-91 / 51 : Architecture d'aujourd'hui n° 268

CONSTRUIRE AVEC LE CLIMAT

60.1: Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 60.2: Systèmes Solaires n° 77-78 / 63: Hélios concours pour une architecture solaire passive / 65.1: Maisons solaires maisons d'aujourd'hui, Guide régional des réalisations, Comité d'Action pour le Solaire / 65.2: Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 66: Systèmes Solaires n° 101, V. Sugot / 67: Palladio, Taschen / 68: Transparent Insulation Technology / 69.1: Deutsche Bauzeitung / 69.2.1: Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 69.2.2: Architecture solaire, un choix qui s'impose / 69.2.4: Systèmes Solaires n° 101, Bermond-Pochon / 70: Réalisations / 71: Arup Associates / 72: Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 73: Architecture solaire, un choix qui s'impose / 74: Transparent insulation technology / 75: Maisons solaires maisons d'aujourd'hui, Guide régional des réalisations, Comité d'Action pour le Solaire / 76: À la recherche des ambiances, R. Delacloche / 77.2.1, 77.2.2, 77.2.3: Energy conscious design, a primer for architects / 77.2.4: À la recherche des ambiances, R. Delacloche / 78.1: Energy conscious architecture / 78.2: F. L. Wright, Taschen / 83: Maisons solaires maisons d'aujourd'hui, Guide régional des réalisations, Comité d'Action pour le Solaire / 84: Documentation rockwool / 90: Documentation St-Roch / 92: IEA task 13, Low energy houses / 95: Deutsche Bauzeitung 12-94 / 96: Systèmes Solaires n° 112, H. El Boughammi / 97: Documentation Stiebel Eltron / 98 : Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche / 99: Architectures solaires en Europe, conceptions, performances, usages / 100.2: Naps International / 101: Systèmes Solaires n° 112 / 102: Systèmes Solaires n° 108, D. Richard-BRGM / 103: Prokon Nord / 106: Solar energy and housing Design, S. Yannas / 107: Commercial and educational buildings / 108: A + U Publishing, L. Kahn

/ 109: Systèmes Solaires n° 101, E. Ducognon / 110: Passive and low energy architecture / 111: Häuser 3-92 / 112: Solar energy and housing design, S. Yannas / 113: Systèmes Solaires n° 112 / 114 : Systèmes Solaires n° 112, R. Delacloche

CONSTRUIRE EN CLIMATS CHAUDS

115.1: R. Delacloche - Fondation Énergies pour le Monde / C. Dejaegere / 116.1: C. Loe-Mie / 117.1, 118.1: C. Dejaegere / 119.1: R. Delacloche - Fondation Énergies pour le Monde / 120.1 : Fondation Énergies pour le Monde / 121.1: C. Dejaegere / 124.1: C. Loe-Mie: 124.2, 125.1: F. Bonneaud / 126.1. : CRATerre / 126.2: Fondation Énergies pour le Monde / 128.1, 128.2, 130.1 : C. Dejaegere / 132.1 : CRATerre / 132.2: J. Nouel - HSHA Observ'ER / 133.1: A. De Herde / 135.1: Chiatello-Dabilly - HSHA Observ'ER / 136.1 : Torcatis - HSHA Observ'ER / 138.1: P. Huguet - HSHA Observ'ER / 139.1: C. Loe-Mie / 140.1: C. Dejaegere / 141.1: CRATerre / 148.2: C. Hauvette, J. Nouel - HSHA Observ'ER / 151.1: Fondation Énergies pour le Monde / 153.1: J.-G. Simon / 154.1: M.-L. Pearce / 155.1: A. De Herde / 156.1: C. Dejaegere / 158.1 : L. Martz - HSHA Observ'ER / 158.2.1: F. Bonneaud / 158.2.2: C. Claikens / 158.2.3, 158.2.4: CRATerre / 159.1: B. Castieao - HSHA Observ'ER / 159.2: C. Claikens / 160.1 : Fondation Énergies pour le Monde / 160.2.3 : A. De Herde / 161.1, 161.2 : CRATerre / 162.1: V. Vaudou - HSHA Observ'ER / 162.2: C. Kints / 163.1: C. et L. Mester de Parajd / 164.1: A. De Herde / 165.1: J.-B. Gay / 166.1: C. Dejaegere / 167.1 : J.-L. Izard / 168.1: A. De Herde / 169.1: CRATerre / 170.1: N. Bourgois / 170.2: C. Dejaegere / 171.1: C. Kanene / 172.1: Fondation Énergies pour le Monde / 173.1: C. Kanene / 174.1: F. Bonneaud / 175.2: CRATerre / 176.1: F. Bonneaud / 176.2: V. Mahaut / 178.1: F. Bonneaud

CONSTRUIRE AVEC LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

179.1, 179.2: Architecture et Climat / 179.3: K. de Myttenaere / 179.4: N. Pulitzer / 179.5: B. Deprez / 179.6: Architecture et Climat / 181.1: La Documentation française / 182.1: Institut franco-allemand de recherche sur l'environnement / 183.1: P. Leroy - HSHA Observ'ER / 184.1: O. Sébart - Observ'ER / 185.1 : P. Lefevre / 186.1: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 187.1: A. Bucher - Minergie / 189. Déchets: R. Bourguet - Ademe / 190.a: Architecture et Climat / 190.b: G. Perraudin / 190.c: Architecture et Climat / 190.d: V. Mahaut / 190.e: Architecture et Climat / 191.b: C. Dejaegere / 191.d: B. Deprez / 191.f: C. Dejaegere / 192.a: B. Deprez / 192.c, 192.d, 192.e, 194.1, 194.4, 194.5: B. Deprez / 198.1 : Plan

urbanisme construction architecture / 200.1 : Architecture et Climat / 202.1: P. Lefevre / 203.1: O. Sébart - Observ'ER / 204.1: European green building forum / 204.2: Architecture et Climat / 207.1, 207.2.1, 207.2.2, 207.2.3, 208.1, 208.2 : Plan urbanisme construction architecture / 209.1: CERN / 210.1: E. Dufrasnes / 210.2: Plan urbanisme construction architecture / 211.1 : Architecture et Climat / 213.1: O. Sébart - Observ'ER / 214.1: Énergie 2000 / 215.2.1, 215.2.2, 215.2.3, 215.2.4: V. Mahaut / 216.1, 217.1: Architecture et Climat / 218.1 : J. Chabaudie - Observ'ER / 219.1: Association intercommunale pour le démergement et l'épuration (A.I.D.E) / 220.1: Plan urbanisme construction architecture / 230.1: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 230: D. Gauzin-Müller / 232.1: Trilux Belgium / 234.1, 235.1: Forbo-Sarlino / 238.1: Littoclime / 239.2.1, 239.2.2, 239.3, 239.4: Centre scientifique et technique de la construction

CONSTRUIRE AVEC L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET ARTIFICIEL

248.2c: M. Bodart / 250.1: S. Altomonte (La Sapienza, Rome) / 251.1: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 251.2b: Philips Lighting / 251.2c, 251.2d: Architecture et Climat / 251.2e à g: Philips Lighting / 253.1: Architecture et Climat / 254.2, 255.2, 258.1, 259.1, 262.1, 264.1: M. Bodart / 266.1: S. Reiter / 269.1: Architecture et Climat / 269.2a: S. Reiter / 269.2b: I. Delattre / 269.2c, 269.2d: S. Reiter / 270.1: Philips Lighting / 270.2a: S. Reiter / 270.2b, 274.1: Architecture et Climat / 274.2b: M. Fontoynt (ENTPE, Lyon) / 276.1: Architecture et Climat / 277.2a: A. Nihoul - Université catholique de Louvain / 277.2b: Centre scientifique et technique de la construction / 277.2c: Architecture et Climat / 278.1, 280.1: M. Bodart / 280.2b: A.G. Hestnes / 281.1, 282.1: M. Bodart / 283.2a, 283.2b, 284.1: S. Reiter / 284.2a, 284.2b: Architecture et Climat / 284.2c, 284.2d: S. Reiter / 284.2e, 284.2f: Architecture et Climat / 284.2g, 284.2h: S. Reiter / 285.1: Bartenbach Lichtlabor / 286.1: Okalux GmbH / 286.2c: ETAP NV / 287.1: Siemens / 288.1: S. Altomonte (La Sapienza, Rome) / 289.1: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 290.1: G. Perraudin / 290.2: C. Richters / 291.1, 291.2: Ville d'Alès / 292.1: RWE Schott Solar GmbH - Phototronics / 292.2: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 293.1: GE Lighting / 293.2: Philips Lighting / 296.1: ETAP NV / 297.1: Zumtobel Staff Benelux NV / 298.1: ETAP NV / 299.1: Bullier International / 301.1: Waldmann Éclairage / 302.1, 303.1: Architecture et Climat / 304.1: C. Cochy - HSHA Observ'ER / 304.2a: Zumtobel Staff Benelux NV / 304.2b: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 305.1, 305.2a, 305.2b, 305.2c: Architecture et Climat / 305.2d: R. Delacloche - HSHA Observ'ER / 306.2a, 306.2b: Architecture et Climat / 307.1: J.-M. Tinarrage - CG 40

AMÉNAGEMENT URBAIN ET DÉVELOPPEMENT DURABLE EN EUROPE

308.2.2: Bénédicte Grosjean / 309.1: Ph. Panerai, J.-Ch. Depaule, M. Demorgon / 309.2.1: Maison du patrimoine, Association Sarcelles et son histoire / 310.2.3: Gettyimages / 311.2.2: Spiekermann & Wegener / 312.1: Disney/EPA Marne / 315.1: Metropolis/COEPT / 316.2.5: Médiathèque centrale de la Commission européenne / 317.2.1: CUS 2003/E. Laemmel / 318.1: Ademe / 322.2: Médiathèque centrale de la Commission européenne / 328.1 et 328.2: EPA Euroméditerranée / 330.2.4: Ministère de l'Équipement / 332.1: Ministère de l'Équipement/SIC 2004/P. Marais / 333.2: Communauté urbaine de Lyon / 334.1.1, 334.1.2: HQE²R/CSTB / 339.1: Kungälv Energi AB / 342.1: Agence d'architecture Jean Nouvel / 342.2.2: Cita / 342.2.3: Darrieus / 343.2: Jacotte Bobroff / 344.2.2: Agence Leplat-Leclercq, architectes / 352.1: Ville de Marseille / 364.1: UIOM du Grand Lyon / 365.1: Toyota / 366.2: Christian Bouly/université de La Rochelle / 368.1: Bike Tree Intl / 368.2.1: Parkeon, International Trade, Philippe Bovet.

Autres photos: DR

Ce traité a été conçu sous la direction d'Alain Liébard, président de l'Observatoire des Énergies Renouvelables et enseignant à l'École d'architecture de Paris La Villette, en collaboration avec André De Herde, directeur d'Architecture et Climat à l'Université catholique de Louvain-la-Neuve. Ont contribué à la réalisation de cet ouvrage : Alexandre Andreassian, Frédéric Bonneaud, Magali Bodart, Vincent Boulanger, Jérôme Chabaudie, Bernard Deprez, Emmanuel Dufrasnes, Éric Durand, Bénédicte Grosjean, Cécile Loe-Mie, Valérie Mahaut, Sigrid Reiter, avec la participation d'Emmanuelle Jorigné, de José Flémal et de Michel Saelen.

Remerciements à : Philippe Bovet, Gaëtan Fovez, Cédric Philibert, Carole Rap, Charlotte Rigaud, Frédéric Tuillé pour leur contribution à la révision de cet ouvrage.

Ce traité a été mis en page par David Laranjeira.

Conception graphique de la couverture : Linette Chambon / Grafibus.

Photos de couverture :

- Rémy Delacloche / Observ'ER Concours Habitat Solaire Habitat d'Aujourd'hui / Architectes : Frédéric Nicolas, Christophe Mégard, Antoine Perrau, Kuhn-Novakov, Jean-Yves Barrier.
- Christian Richters / Architectes : Jourda-Perraudin.

Direction générale : Yves-Bruno Civel.

