



UE COPPA Concevoir - ACV

Enjeux des procédés durables

2024-2025

Olivier Kerbrat, ENS Rennes
olivier.kerbrat@ens-rennes.fr
Bruno Lavis, Arts et Métiers
bruno.lavis@ensam.eu



Thomas Midgley



Thomas Midgley (1889-1944)



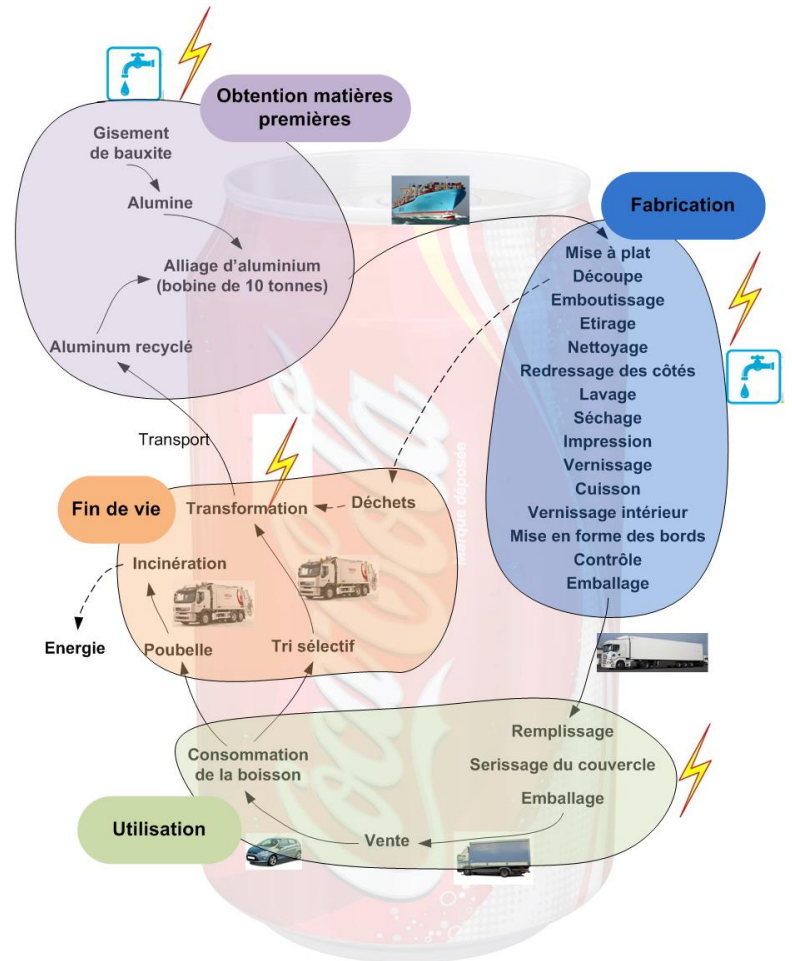
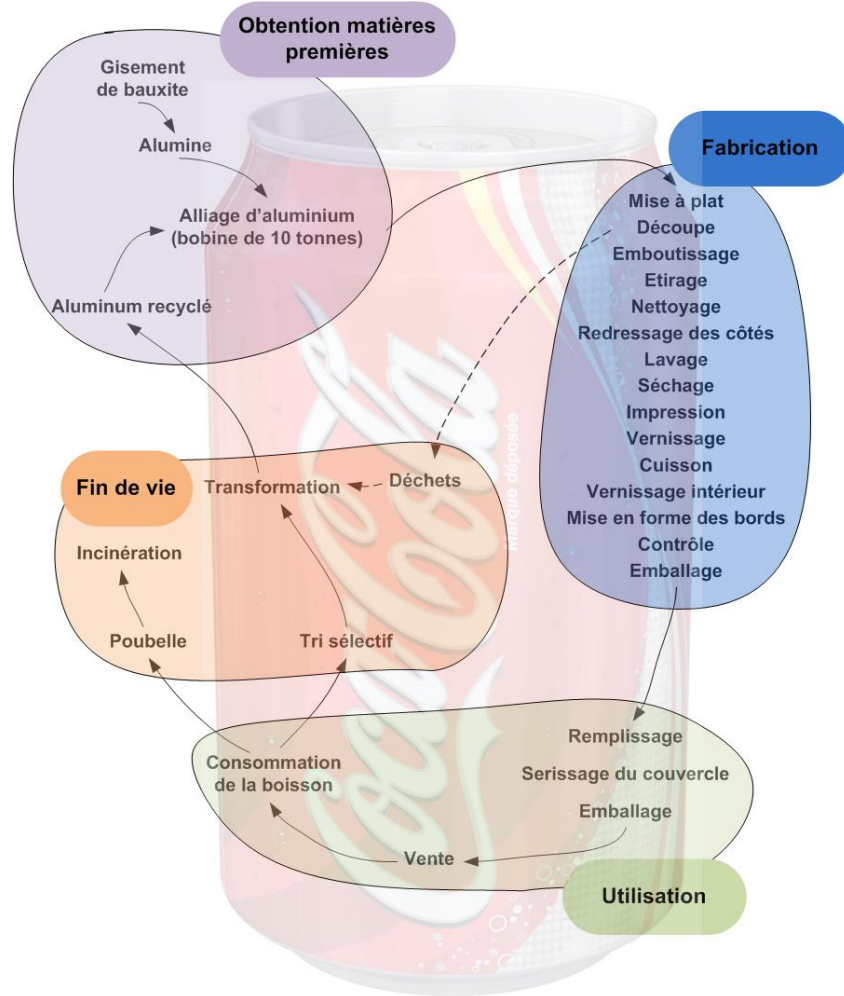
Que peut-on conclure sur l'analyse environnementale des produits ?

Prendre en compte **toutes les étapes du cycle de vie** pour comprendre les impacts sur l'environnement du produit.

Il y a différents types d'impacts. Santé humaine – toxicité, destruction de la couche d'ozone. Il convient alors évidemment **d'éviter le transfert d'impacts.**

Il s'agit d'un **problème global**, les impacts concernent la planète (et donc l'humanité) toute entière. Les réponses doivent donc être mondiales.

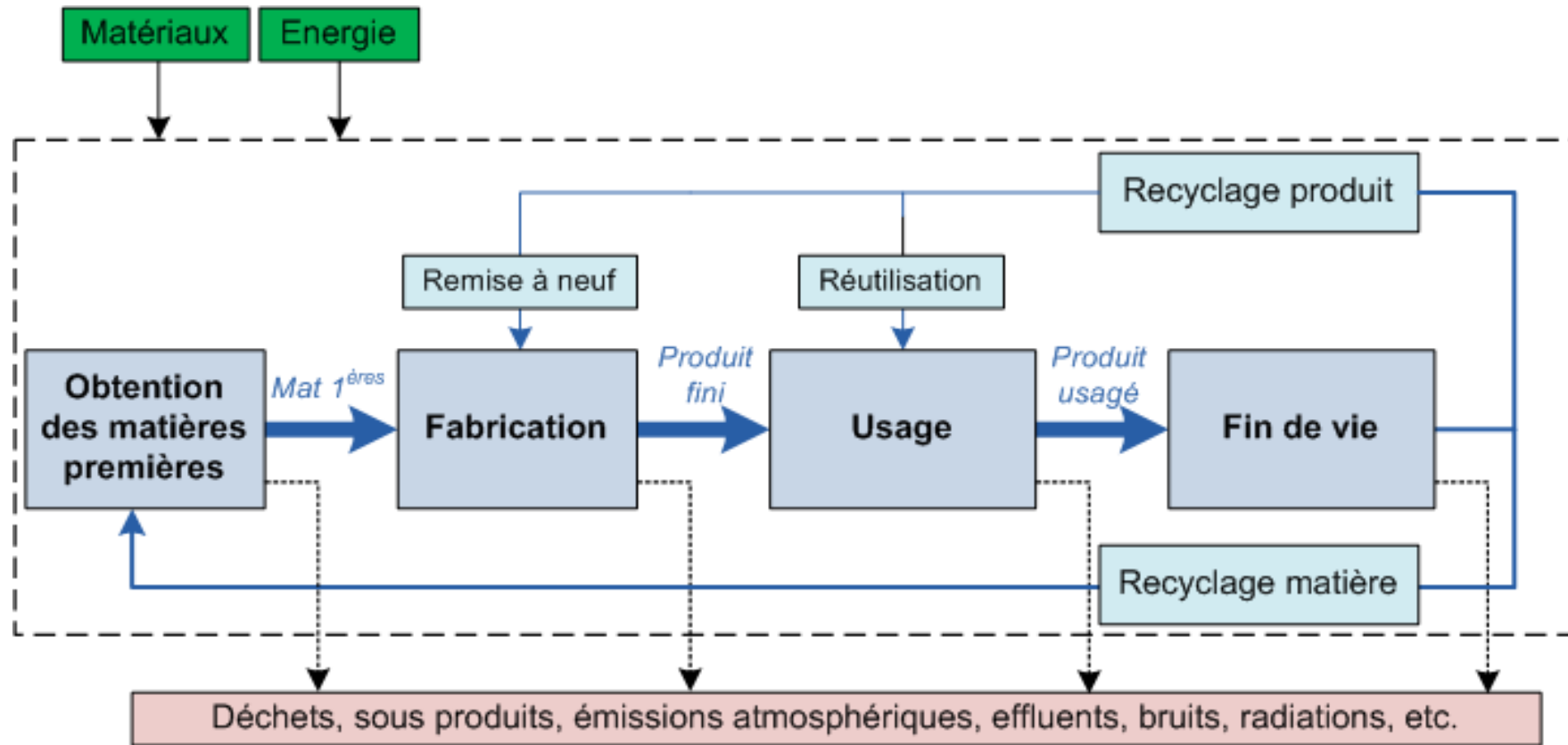
Canette de boissons



Pistes d'écoconception

- Le recyclage d'une canette nécessite **95% d'énergie en moins** que la production d'une nouvelle canette.
- La production en "wall to wall" permet d'économiser chaque année l'équivalent en émissions de plus de **8,75 millions de kilomètres** de voyage en camion.
- Forme et masse adaptées. Le conditionnement en canettes est **idéal** pour le transport.
- **Transport intelligent : produit moins d'émissions de CO2**
- Les réfrigérateurs qui réduisent la consommation d'énergie de 45 %
- L'énergie utilisée pour la production peut provenir jusqu'à **80 %** environ d'énergies renouvelables.

Place de la fabrication dans le cycle de vie de produit



Programme de la séance

Qu'appelle-t-on procédés durables ?

Pourquoi s'y intéresser ?

Qu'est-ce qui existe déjà ?

Vocabulaire

Durable = Sustainable *Sustainable manufacturing*

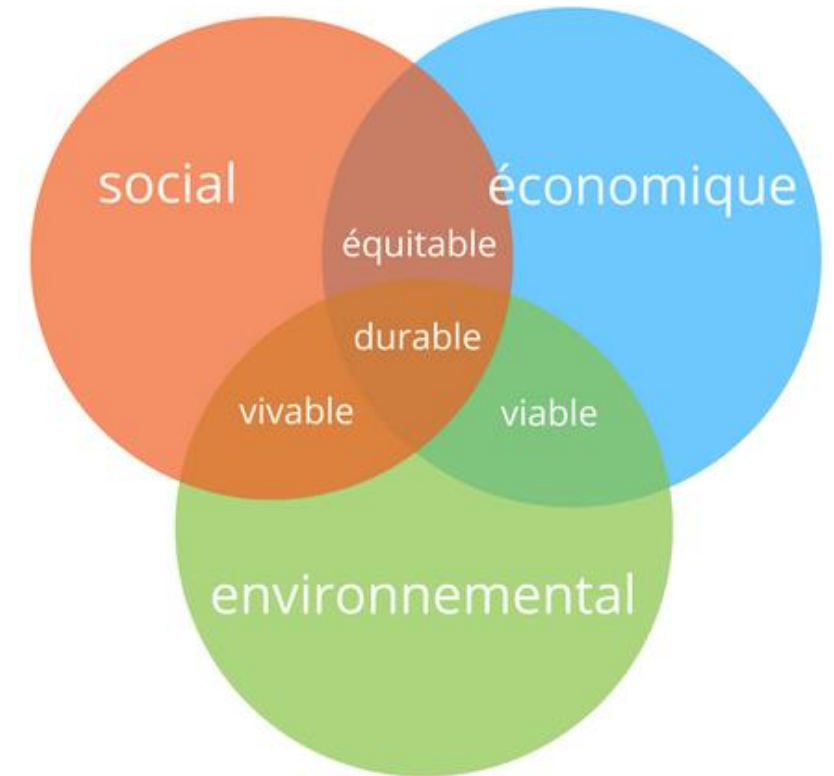
L'adéquation d'un système au principe de développement durable est vérifiée par **l'évaluation des trois critères du DD sur l'ensemble du cycle de vie** du système

Procédés durables

Être en mesure d'inscrire les procédés de mise en forme dans un contexte de développement durable, c'est-à-dire en **maîtriser les aspects économique, environnemental et social de façon couplée**

Quel critère est principalement utilisé en industrie pour prendre des décisions sur les procédés?

Comment les deux autres critères interviennent-ils?



Vocabulaire

Intersection environnement et fabrication



Différentes approches
Pas de définition clairement adoptée
Idées confuses !

Fabrication durable

Applications de démarches visant à utiliser **moins d'énergie et de matière**, produire **moins de déchets**, utiliser moins de matières dangereuses pour **réaliser des produits** écoconçus

Technologies propres

Technologies associées à la protection de l'environnement, au contrôle et à la prévention de la pollution, au management des déchets, à l'élimination de matières dangereuses, ...

Ecoconception de produits

Intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits en considérant l'ensemble du cycle de vie du produit

Définition restrictive

Il s'agit de comprendre pourquoi et comment réussir à intégrer des considérations environnementales dans les procédés de mise en forme

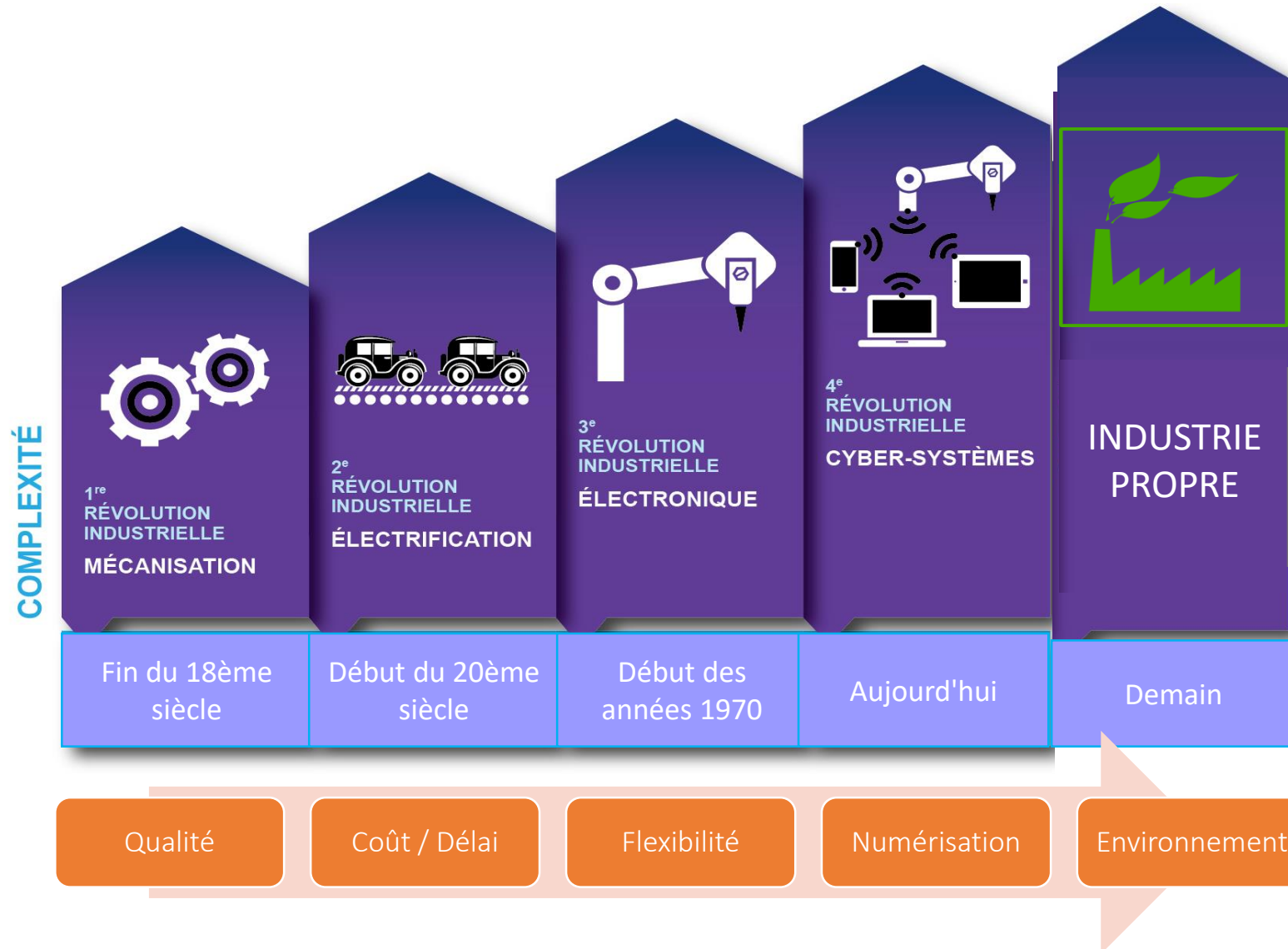
Programme de la séance

Qu'appelle-t-on procédés durables ?

Pourquoi s'y intéresser ?

Qu'est-ce qui existe déjà ?

Evolution de l'industrie manufacturière



L'effet de multiplication d'emplois de l'industrialisation a un impact positif sur la société :
Chaque emploi dans le domaine de la fabrication crée 2,2 emplois dans d'autres secteurs

Des nouveaux domaines de performance à intégrer



Règlementations / Normalisations



INTERNATIONAL
STANDARD

ISO
14955-1

Second edition
2017-11

**Machine tools — Environmental
evaluation of machine tools —**

**Part 1:
Design methodology for energy-
efficient machine tools**

*Machines-outils — Évaluation environnementale des machines-
outils —*

*Partie 1: Méthode de conception pour l'efficacité énergétique des
machines-outils*



*Responsabilité
sociétale des
entreprises*



*Registration,
Evaluation,
Authorization and
restriction of
Chemicals*



Limite le

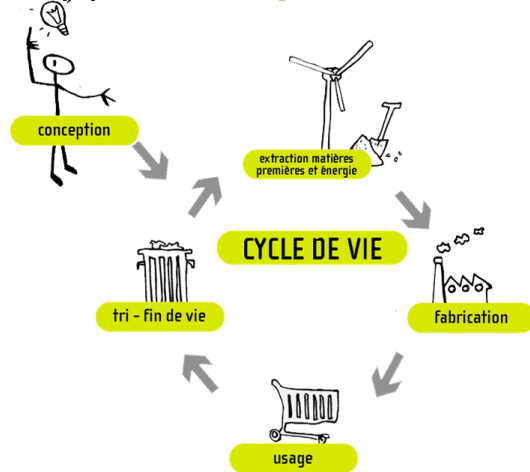
- Plomb
- Mercure
- Cadmium
- Chrome hexavalent
- Polybromobiphényles
- Polybromodiphényléthers

Principes de l'écoconception

Intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits (biens et services, systèmes) avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie à service rendu équivalent ou supérieur.

Approche dès l'amont d'un processus de conception vise à trouver le **meilleur équilibre entre les exigences environnementales, sociales, techniques et économiques** dans la conception et le développement de produits.

Approche cycle de vie



Maîtrise des transferts d'impacts

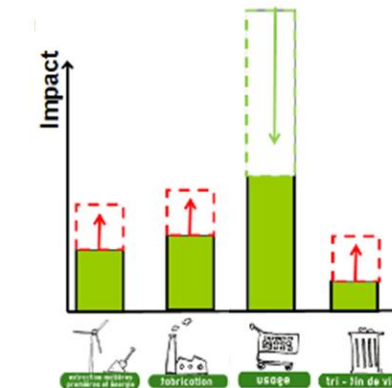


Illustration du transfert d'impact d'une étape du cycle de vie à d'autres étapes.

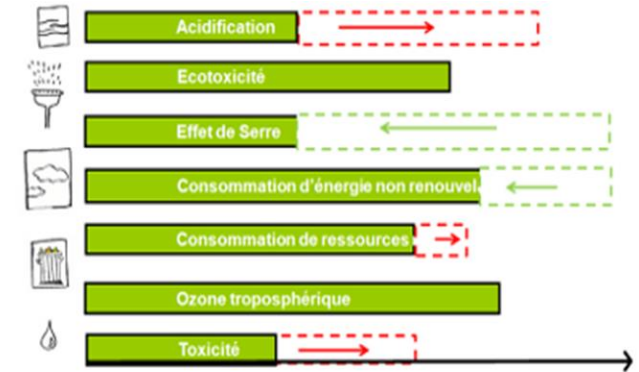


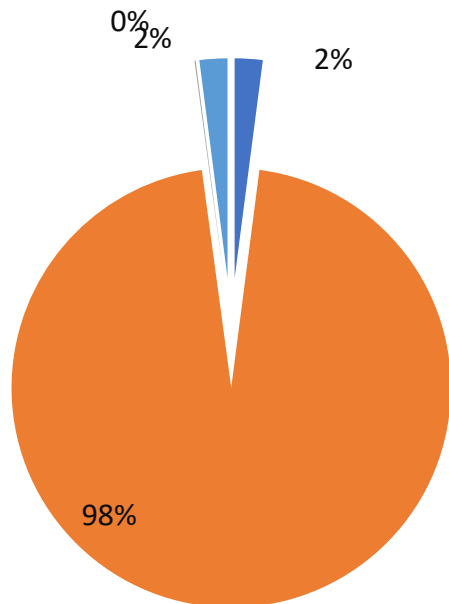
Illustration du transfert d'impacts à d'autres impacts environnementaux

L'écoconception, grâce à sa vision multicritère et multi-étapes permet d'éviter les transferts d'impacts, ou tout du moins, les identifier lors de l'annonce de résultats comparatifs.

La phase de fabrication dans la vie d'un produit

Produit passif

Répartition des impacts environnementaux d'un stylo à bille

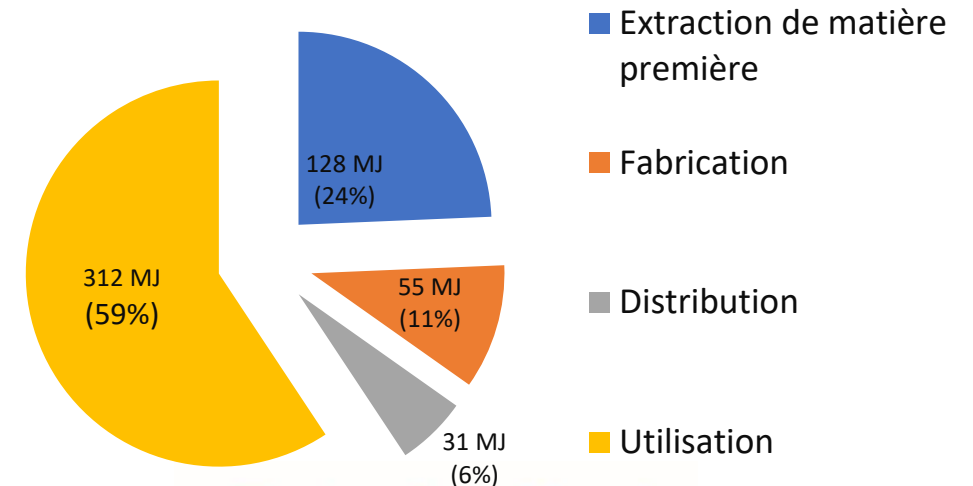


- Extraction de matière première
- Fabrication
- Distribution
- Utilisation
- Fin de Vie



Produit actif

Répartition des impacts environnementaux d'un bras d'écran individuel en aéronautique



- Extraction de matière première
- Fabrication
- Distribution
- Utilisation
- Fin de Vie

Exemple

Exemple : changement de matériau pour une pièce d'Airbus A380 :

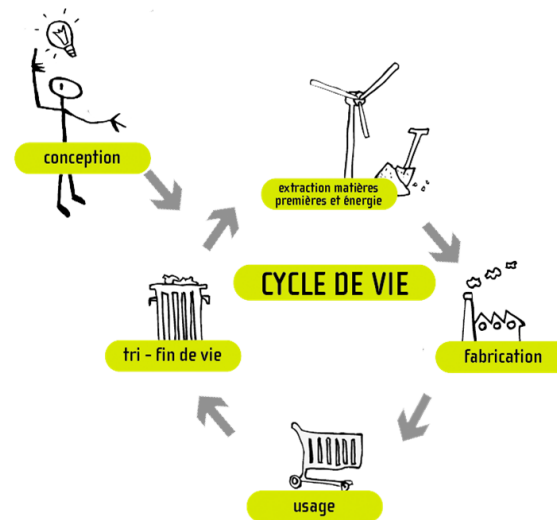
Aluminium → Composite PEEK – Fibre de Carbone

Quelles considérations ont guidé ce choix ?

Est-il possible de modifier **seulement** le matériau ?

Quel est l'impact environnemental de ce choix ?

Quelles sont les difficultés dans une analyse de cycle de vie ?



Programme de la séance

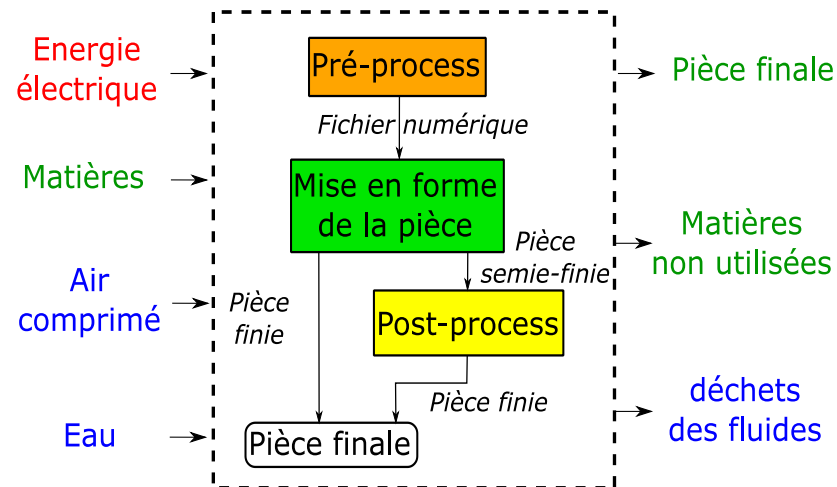
Qu'appelle-t-on procédés durables ?

Pourquoi s'y intéresser ?

Qu'est-ce qui existe déjà ?

Ce qu'on cherche à faire

- Caractériser quantitativement les flux élémentaires
 - L'énergie électrique
 - La consommation et le rejet de matériaux
 - La consommation et le rejet des fluides
- Pour l'ensemble des étapes de fabrication d'une pièce



La performance environnementale des procédés est donc liée à

La consommation d'énergie électrique

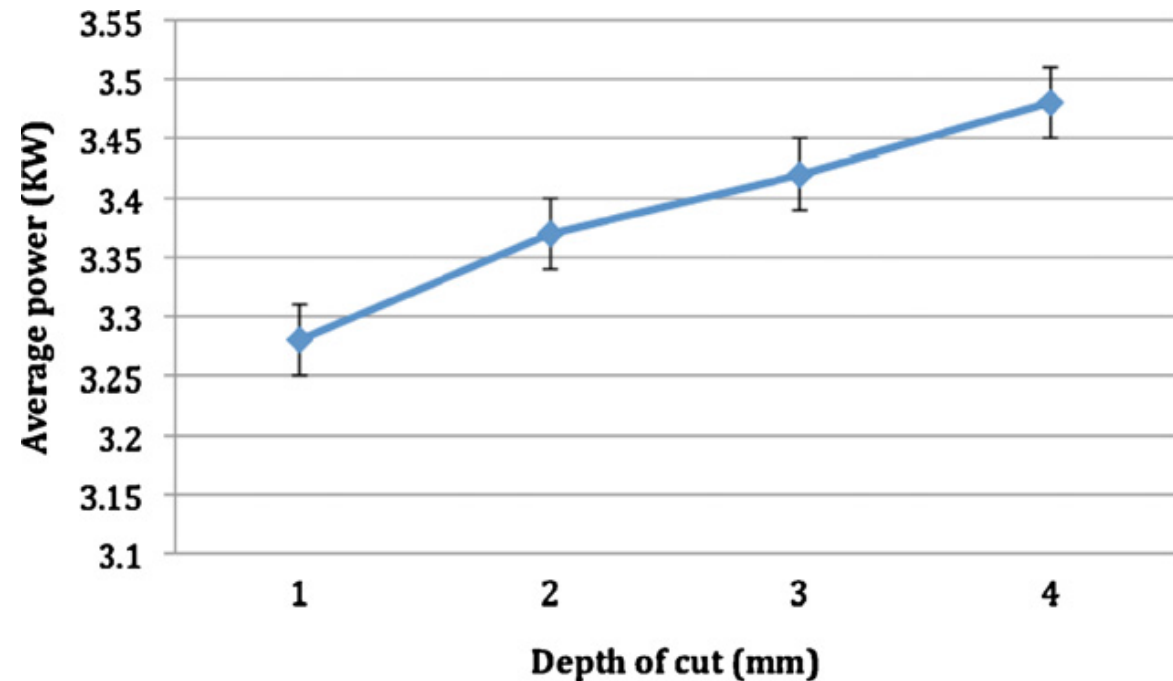
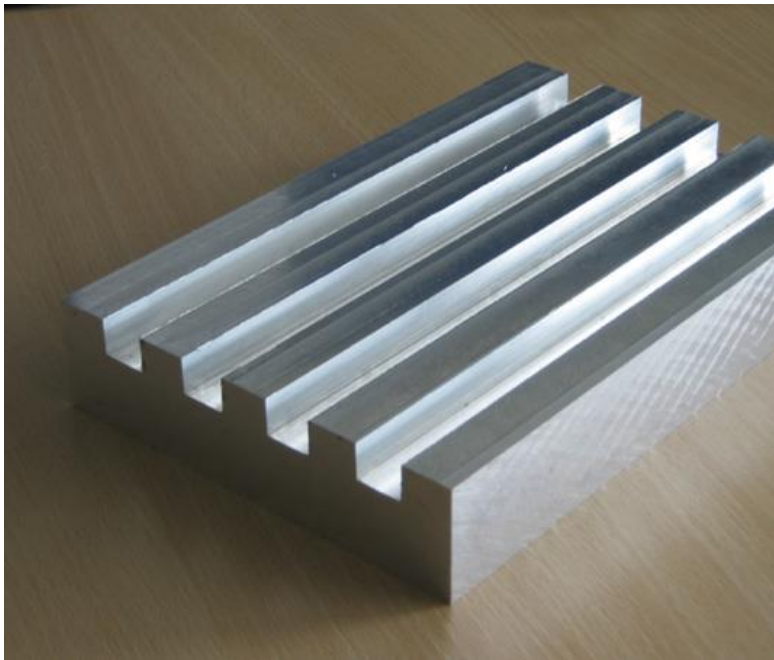
**La consommation et le rejet des différents fluides
nécessaires au procédé**

La consommation et le rejet des matières lors du procédé

L'ensemble des processus intervenant dans le procédé

Consommation électrique relevée expérimentalement

Analyse de la puissance absorbée en fonction des paramètres machines

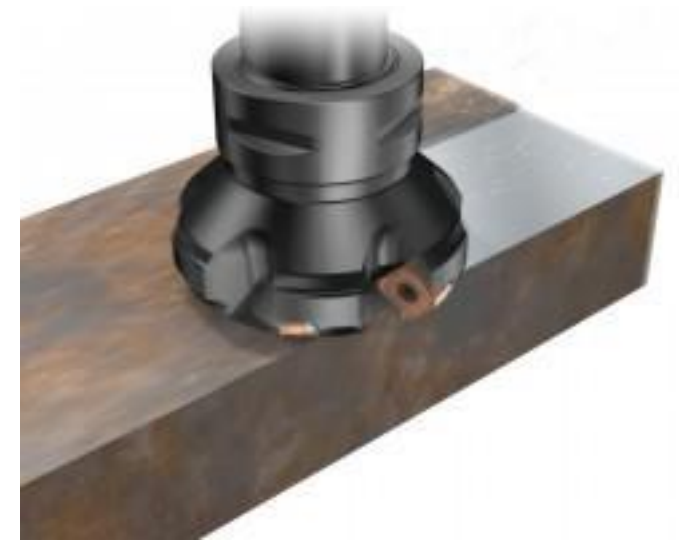
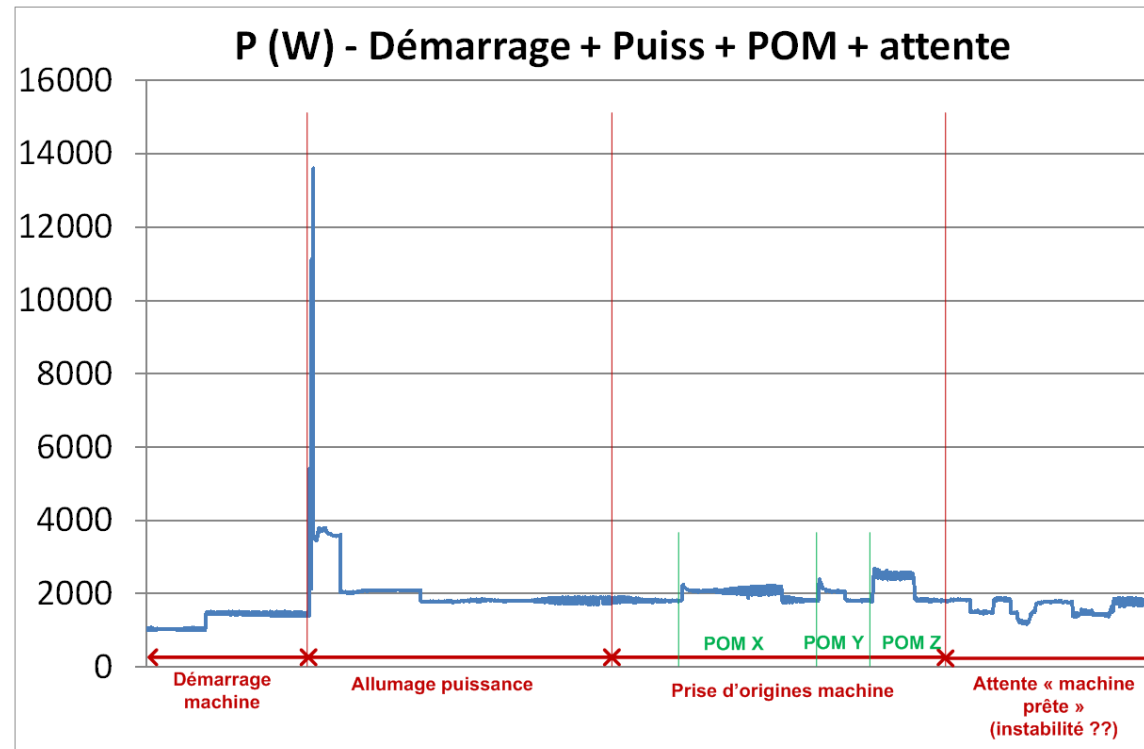


Consommation électrique relevée expérimentalement

Analyse de la puissance absorbée en fonction des paramètres machines

Expérimentations pour une opération simple de surfacage

- Préparation de la machine

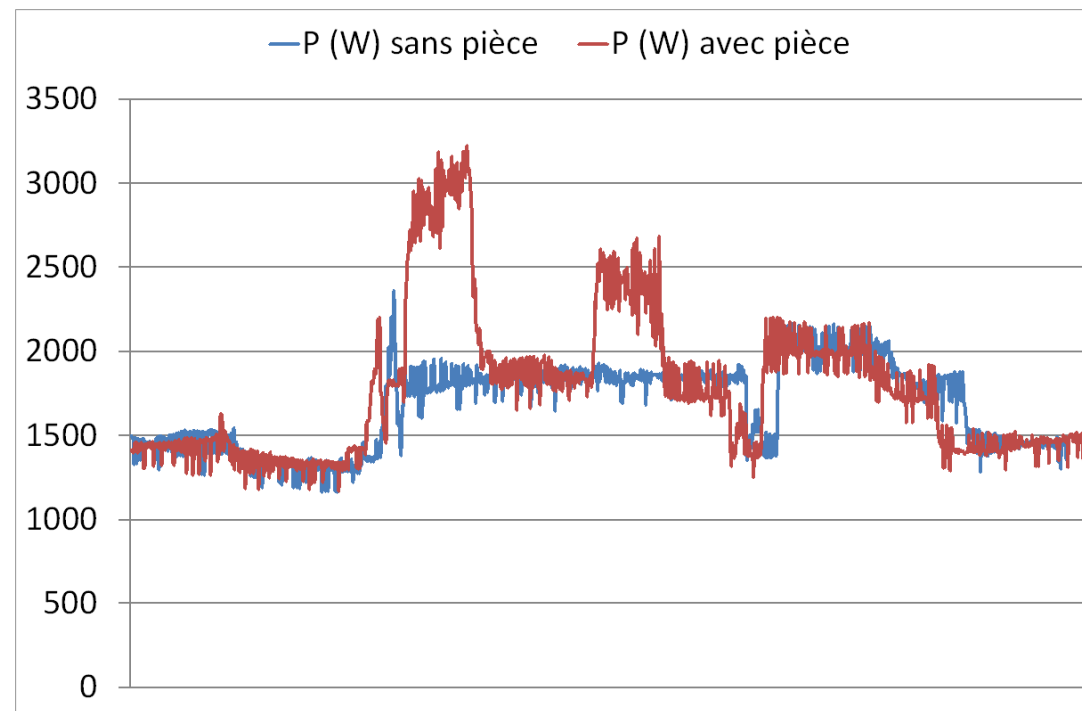


Consommation électrique relevée expérimentalement

Analyse de la puissance absorbée en fonction des paramètres machines

Expérimentations pour une opération simple de surfacage

- Préparation de la machine
- Lancement du cycle de fabrication

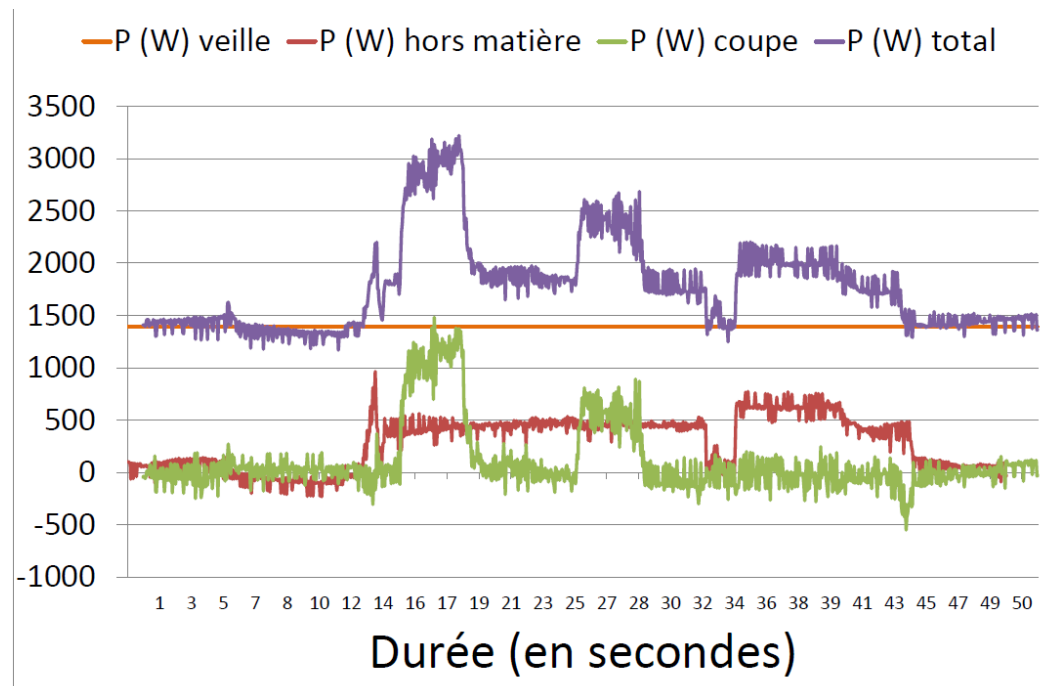


Consommation électrique relevée expérimentalement

Analyse de la puissance absorbée en fonction des paramètres machines

Expérimentations pour une opération simple de surfacage

- Préparation de la machine
- Lancement du cycle de fabrication
- Analyse de l'énergie « utile »



Cas de l'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant

Consommation électrique relevée expérimentalement

Les relevés expérimentaux permettent de caractériser 1 opération
(sur 1 machine, avec 1 outil, pour la mise en forme d'1 matériau, avec 1 jeu de paramètres)



Nécessite donc plusieurs essais, en respectant un protocole strict !

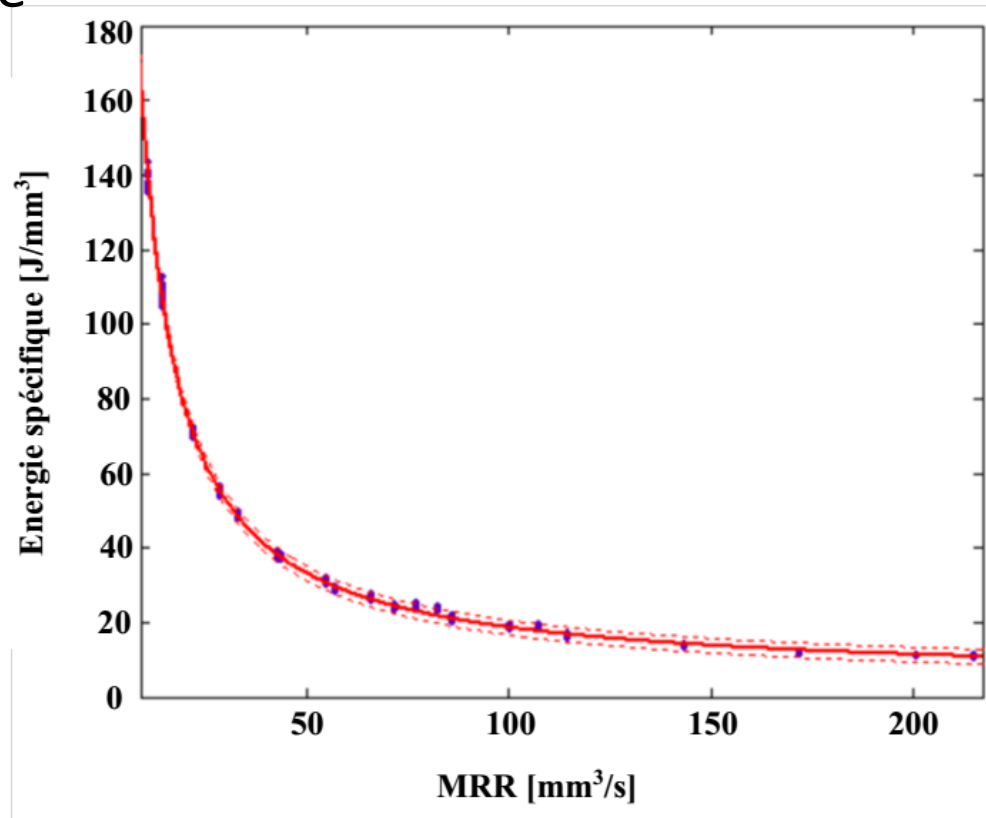


Permet d'obtenir des modèles prévisionnels fiables

Cas de l'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant

Modélisation mathématique liée à la théorie de la coupe

Modèle d'estimation quantitative de la consommation énergétique en fonction du débit de matière usiné



Modèle prédictif



Ne prend en compte
que la phase de coupe
de la machine

Cas de l'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant

Modélisation analytique orientée processus

Décomposition du processus en différents états de fonctionnement

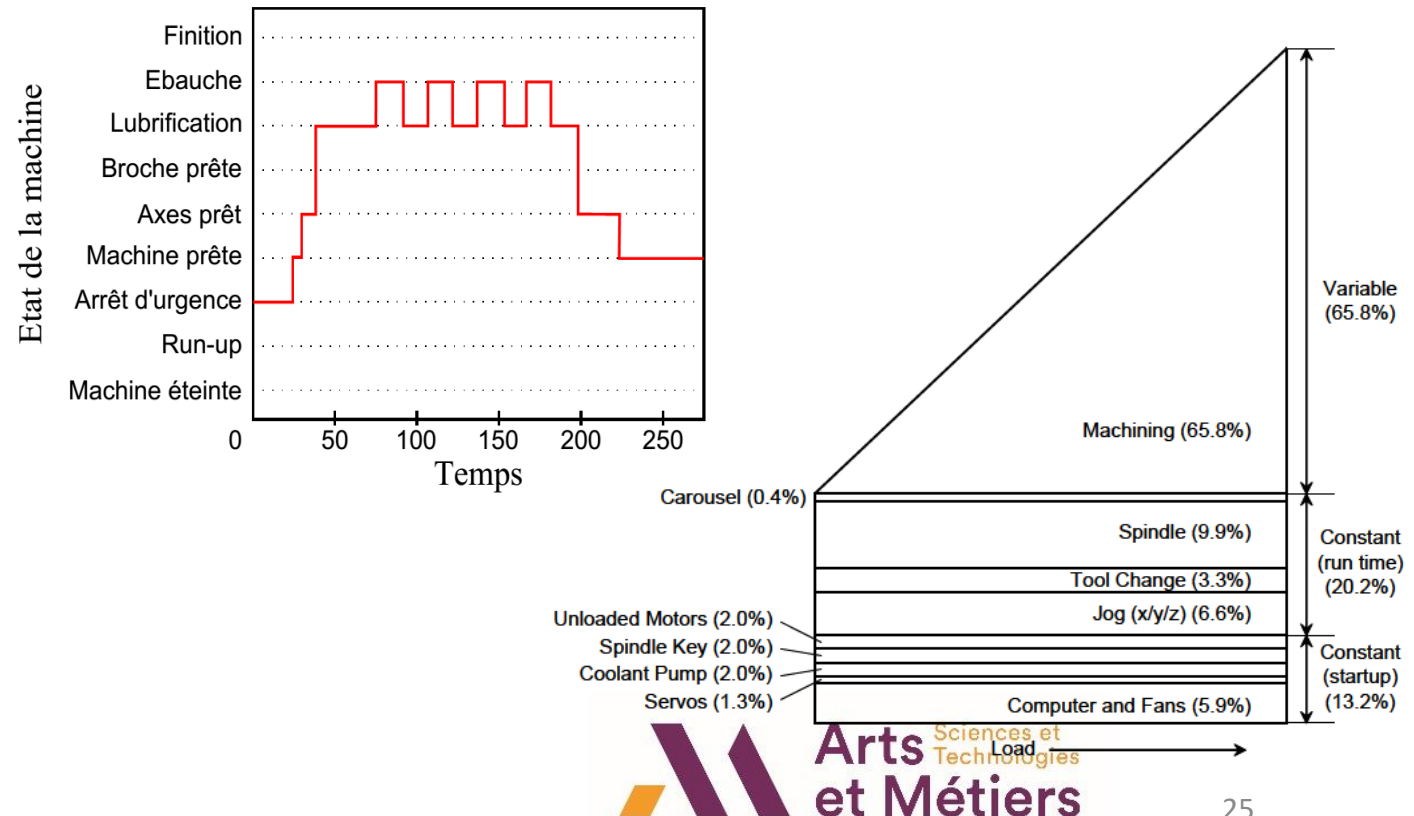
Développement de modèles mathématiques basés sur des états de la machine d'usinage



Permet de mettre
en évidence
les sources de
consommation importantes



Comment exploiter
cette information ?



Cas des fluides de coupe

Utilisation de fluides de coupe dans l'usinage des métaux :

- Dissiper la chaleur
- Lubrifier la zone de contact outil-pièce
- Evacuer les copeaux



Les fluides de coupe améliorent la durée de vie outil et la productivité.....MAIS :

- Risque chimique, par contact cutané ou par inhalation
- Risque biologique, par espèces bactériennes ou fongicides pathogènes
- Maladies professionnelles
- Déchets dangereux
- Chutes sur le sol glissant
- Bruit



Les fluides de coupe présentent un risque environnemental et sanitaire

Trois stratégies pour minimiser l'utilisation des fluides de coupe

Usinage à sec
Dry machining

Usinage avec quantité minimale de lubrifiant
MQL Minimum quantity lubricant

Usinage à assistance cryogénique
Cryogenic machining

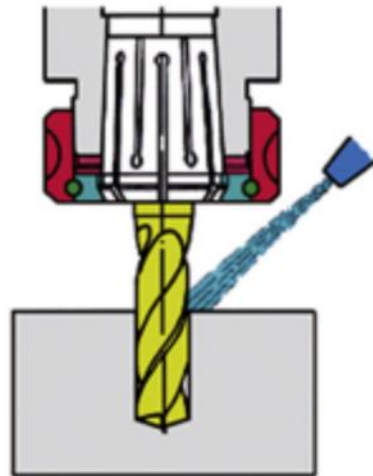
Usinage à sec



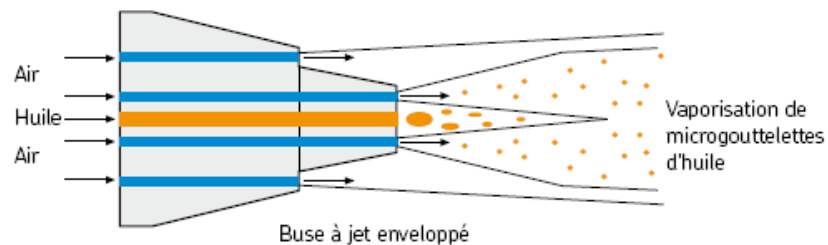
Poche 120x60x36
Longueur d'usinage
parcourue : 2 494 mètres

Usinage avec quantité minimale de lubrifiant

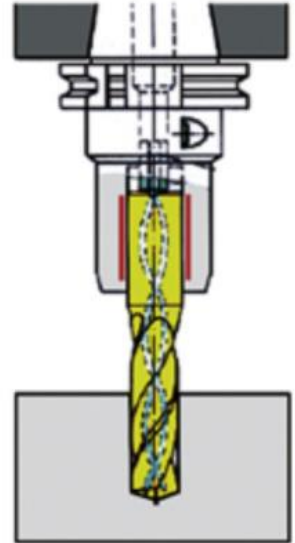
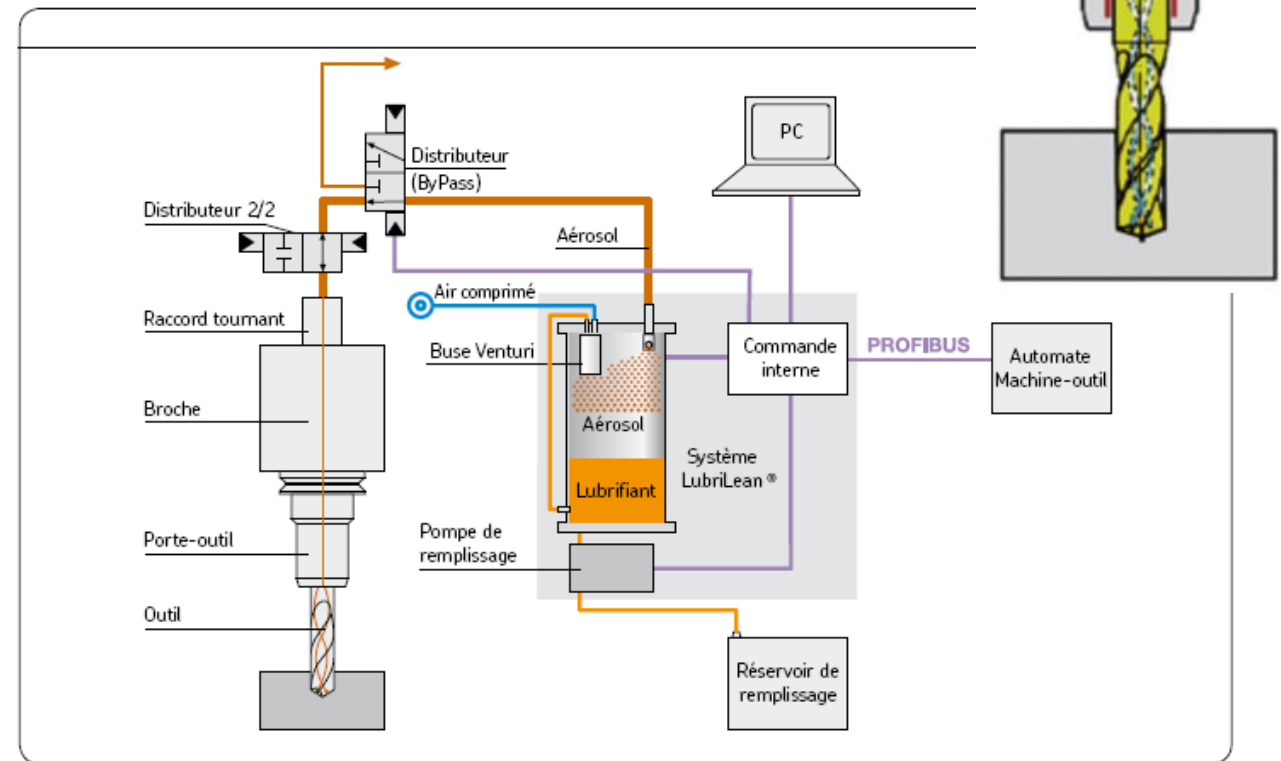
Microlubrification externe



Vaporisation de microgouttelettes à l'aide d'une buse à jet enveloppé



Microlubrification interne (par le centre)



Usinage avec assistance cryogénique

Refroidissement de la zone de coupe par fluides cryogéniques non synthétisés
(ex : azote liquide)

Avantages :

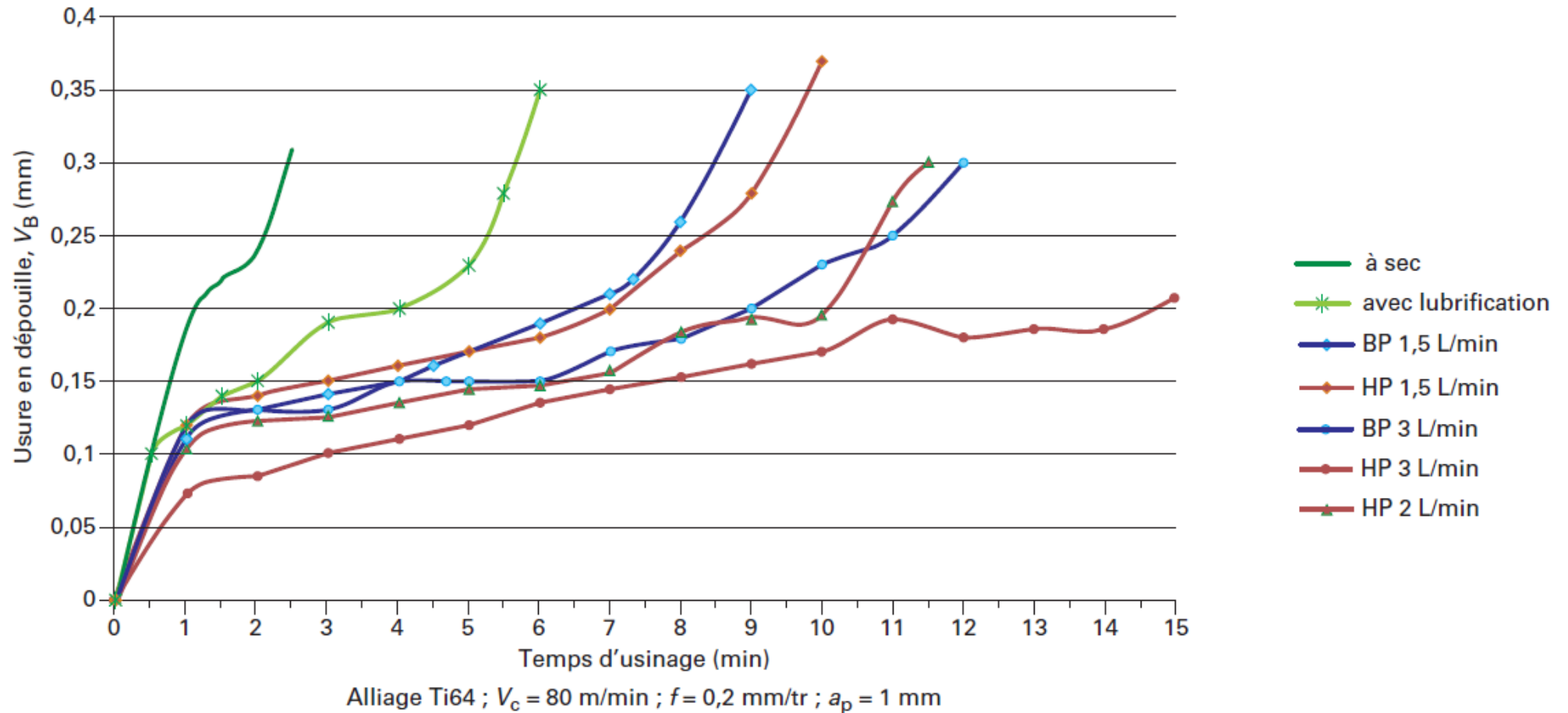
- Fluide au **pouvoir réfrigérant élevé**
- **Expansion** du liquide en gaz dans son changement de phase qui permet d'évacuer les copeaux
- **Pas besoin de nettoyer** les pièces

Inconvénients :

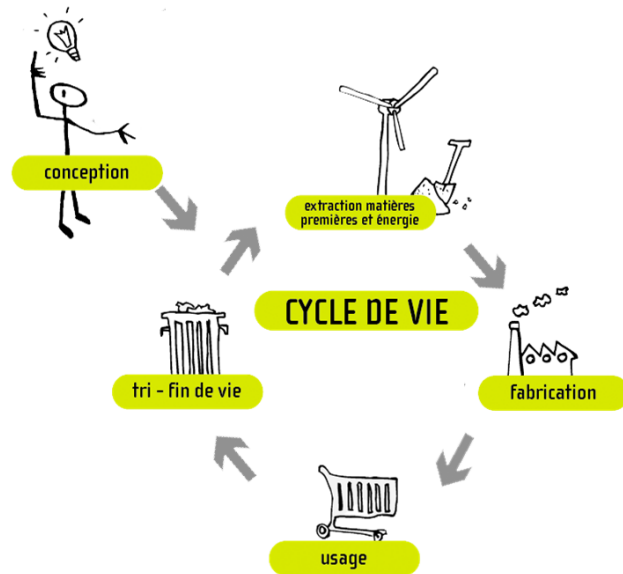
- **Coût** de l'installation



Minimisation de l'utilisation des fluides de coupe : comparaison des stratégies



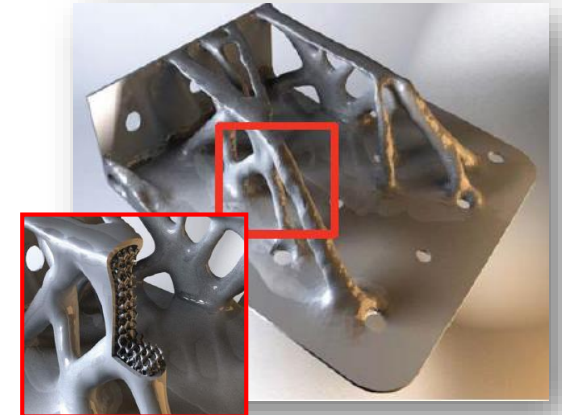
Apports de la fabrication additive pour la fabrication propre ?



**Phase d'usage :
minimisation de masse dans les
systèmes embarqués**



Charnière des capots moteur de l'A380



Pièce optimisée

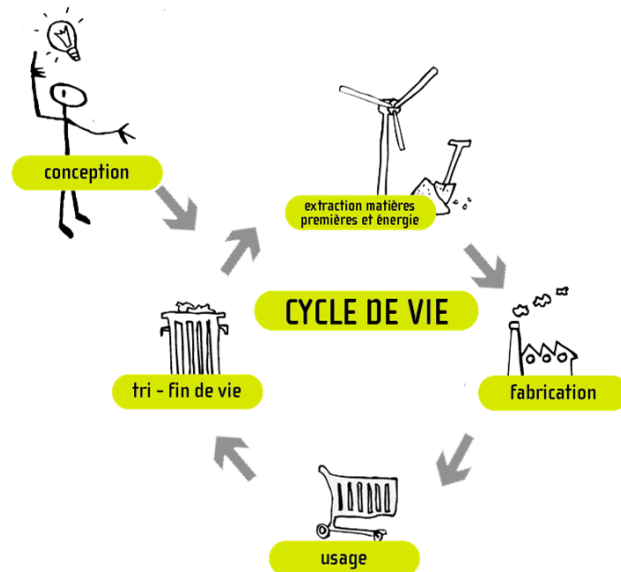


Masse
285 g



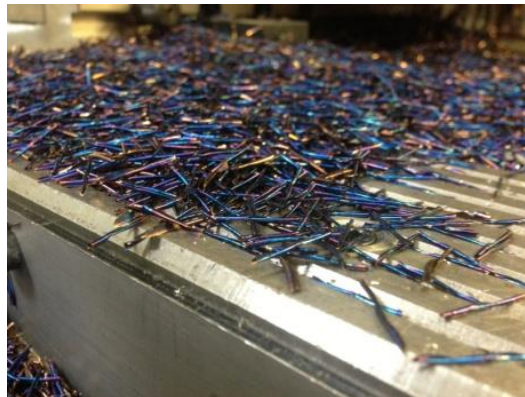
Masse
148 g

Apports de la fabrication additive pour la fabrication propre ?



**Phase de fabrication :
minimisation de déchets et de lubrifiants**

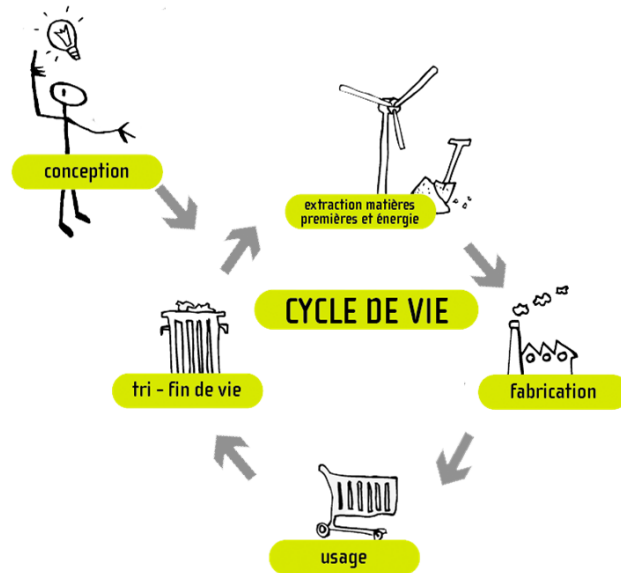
Usinage



Fabrication additive

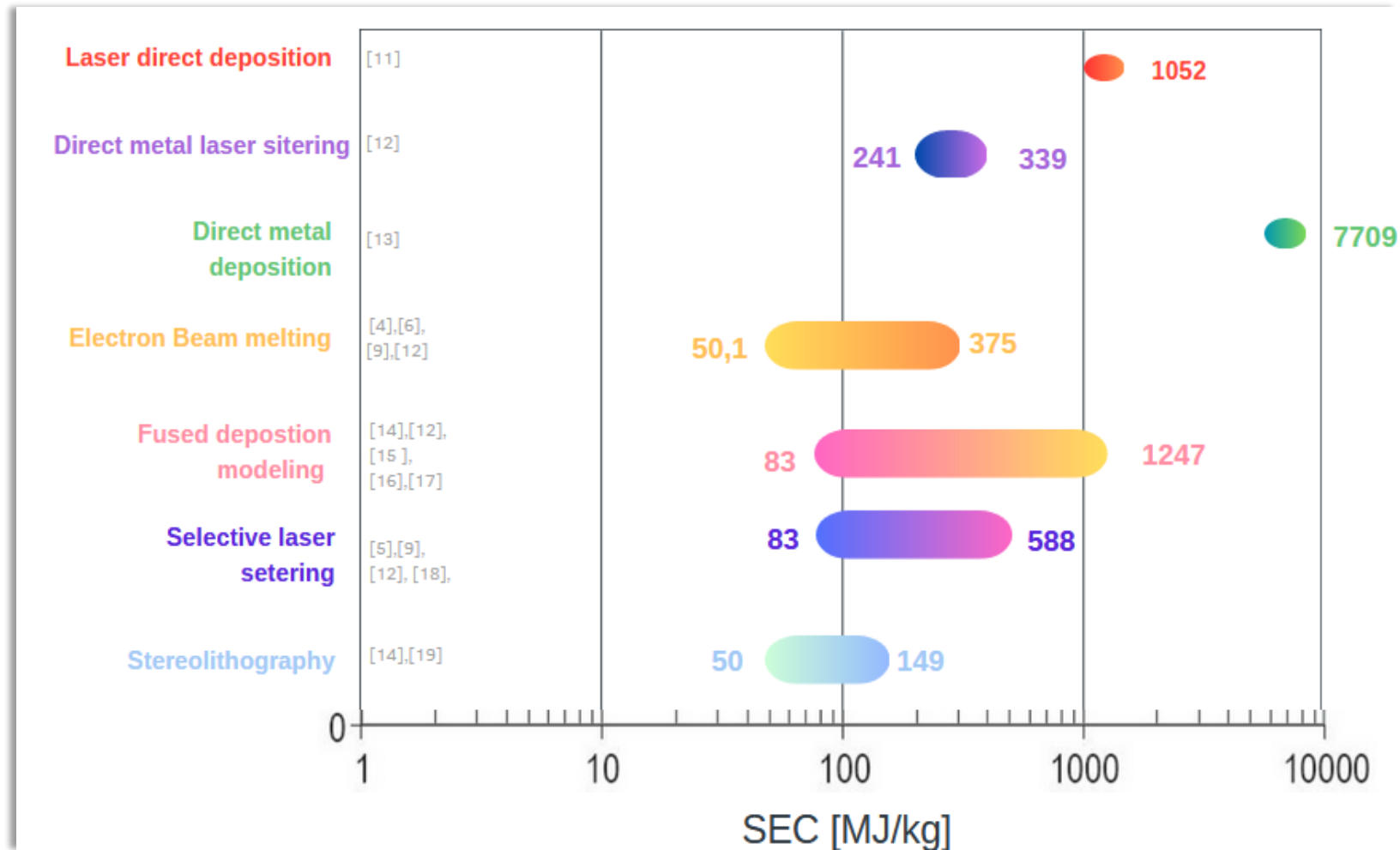


Apports de la fabrication additive pour la fabrication propre ?



**Phase de fin de vie :
Rechargement de pièce**

Specific energy consumption (SEC)

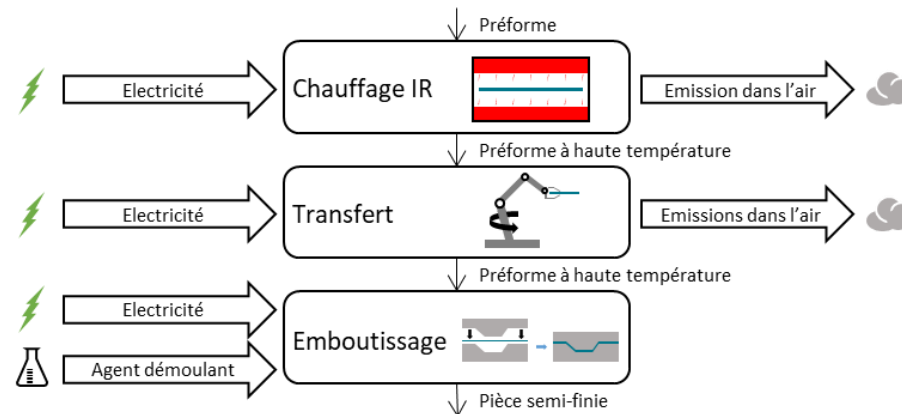


Indicateur énergétique

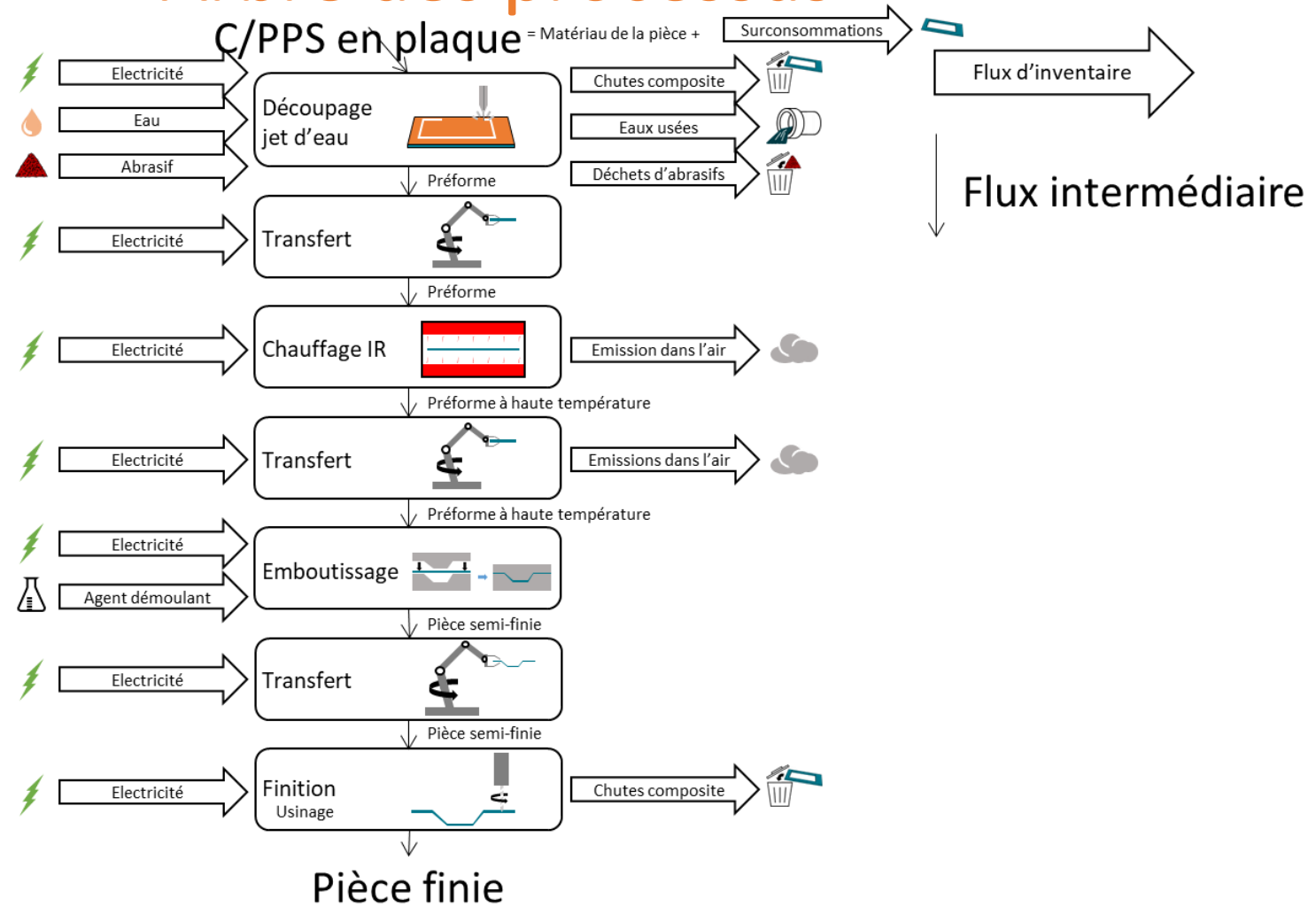
$$SEC = \frac{\text{Energie consommée}}{\text{Masse déposée}}$$

Répartitions des SEC selon la technologie de FA

Application au thermo-estampage de composite PPS/C



Arbre des processus



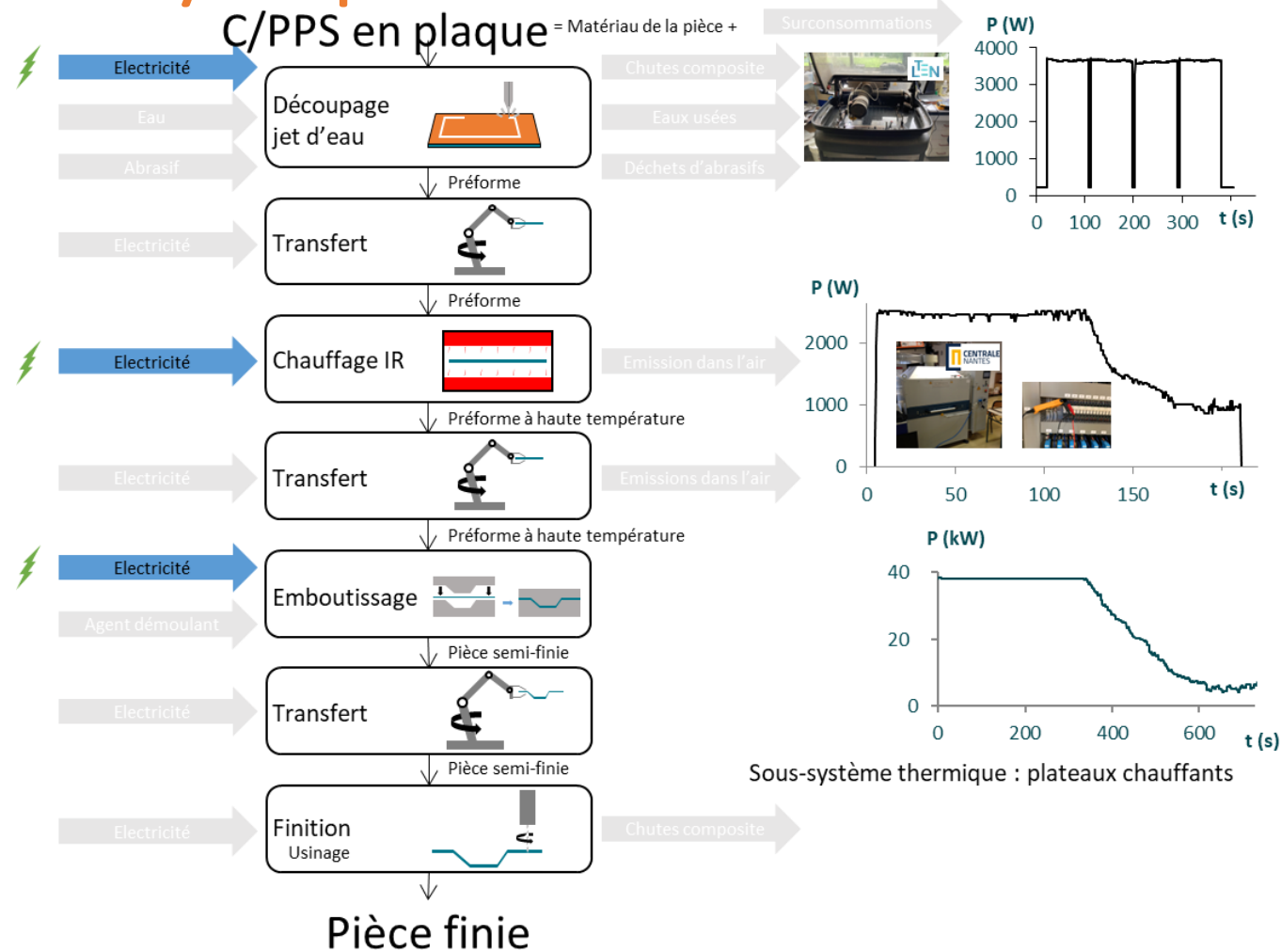
Analyse quantitative des flux

Méthode de collecte de données :

➡ : Mesures



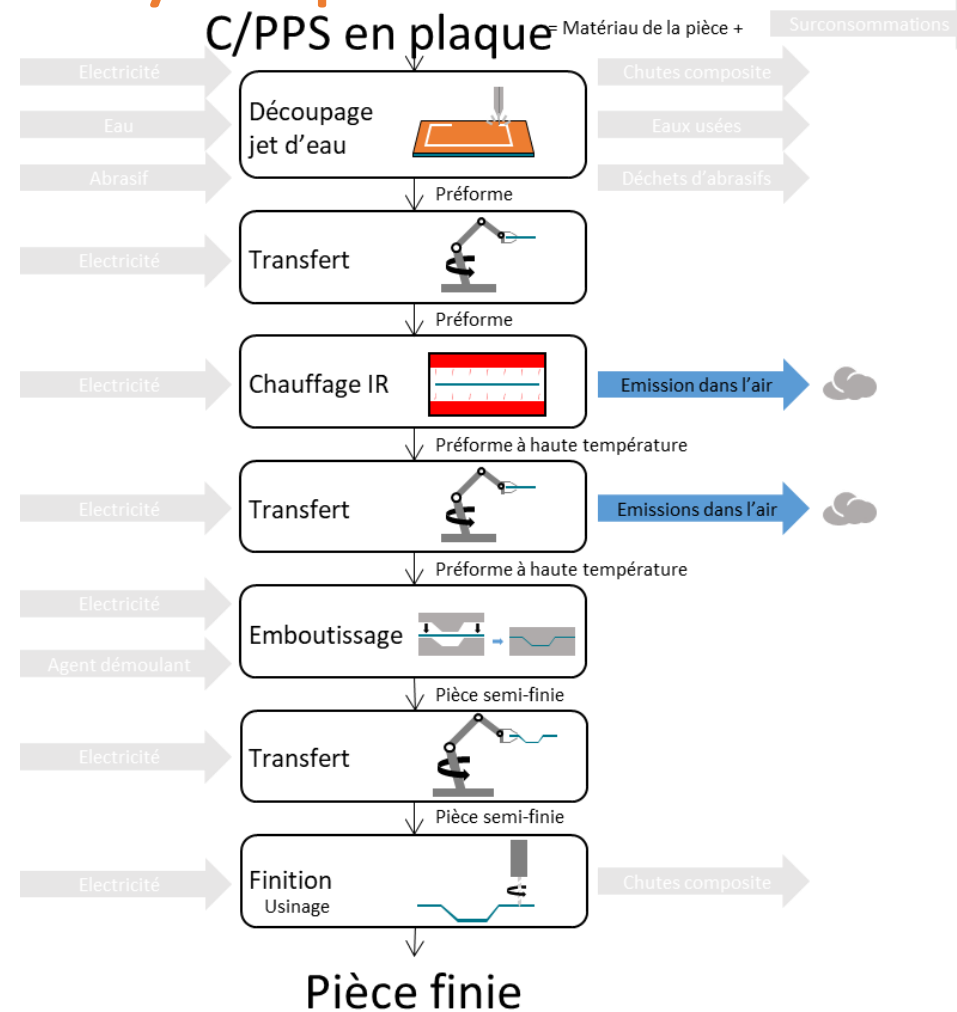
Fluke 434 II



Analyse quantitative des flux

Méthode de collecte de données :

➡ : Mesures



Relevés avec des appareils de mesure portables :



Détecteur à photoionisation
Q-TRAK (TSI)

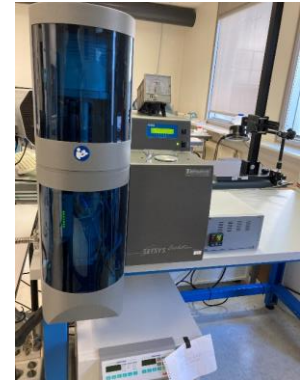


Compteur de particules
optique
DUSTTRAK (TSI)

+ essais ATG - MS



MS Pfeiffer
Vacuum



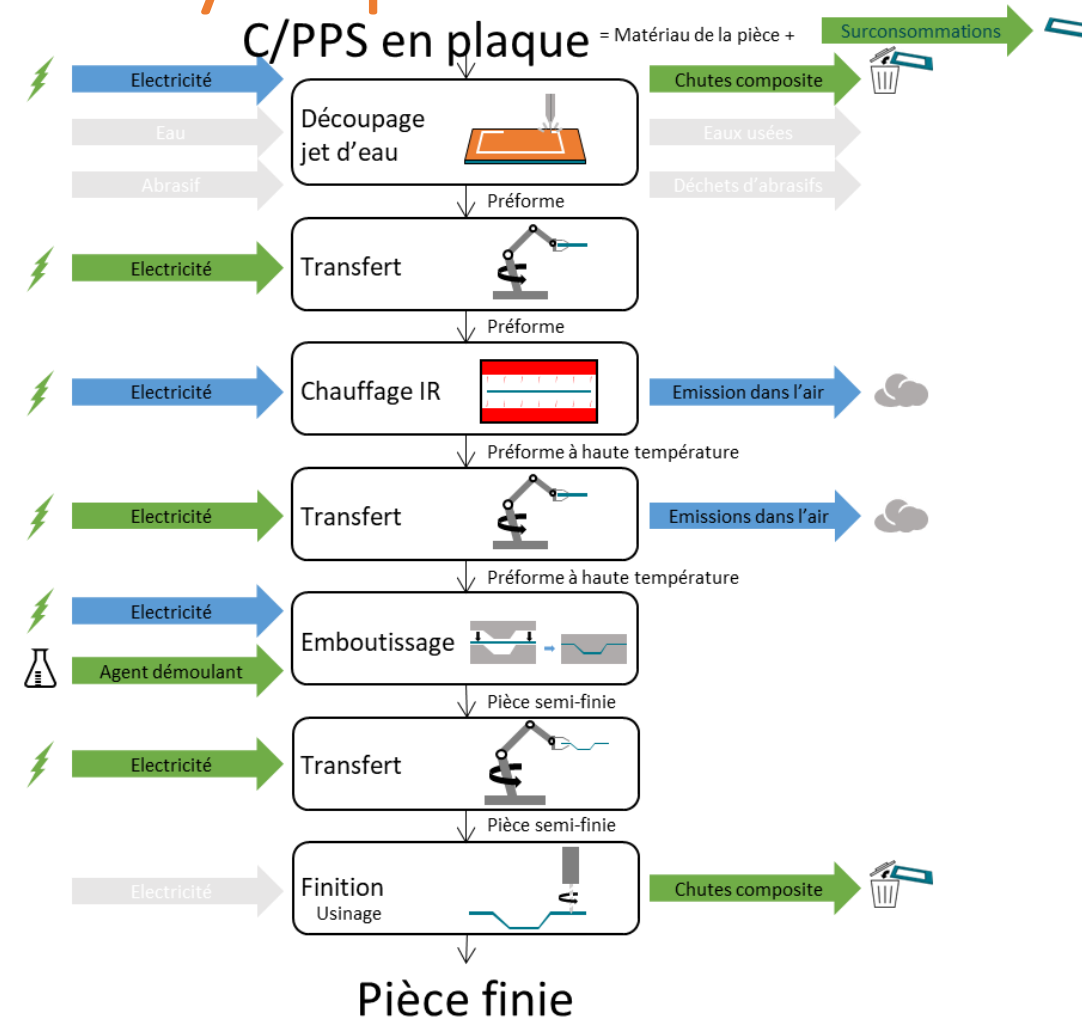
ATG Setsys
Evolution

Analyse quantitative des flux

Méthode de collecte de données :

→ : Mesures

→ : Littérature



Analyse quantitative des flux

C/PPS en plaque

= Matériau de la pièce +

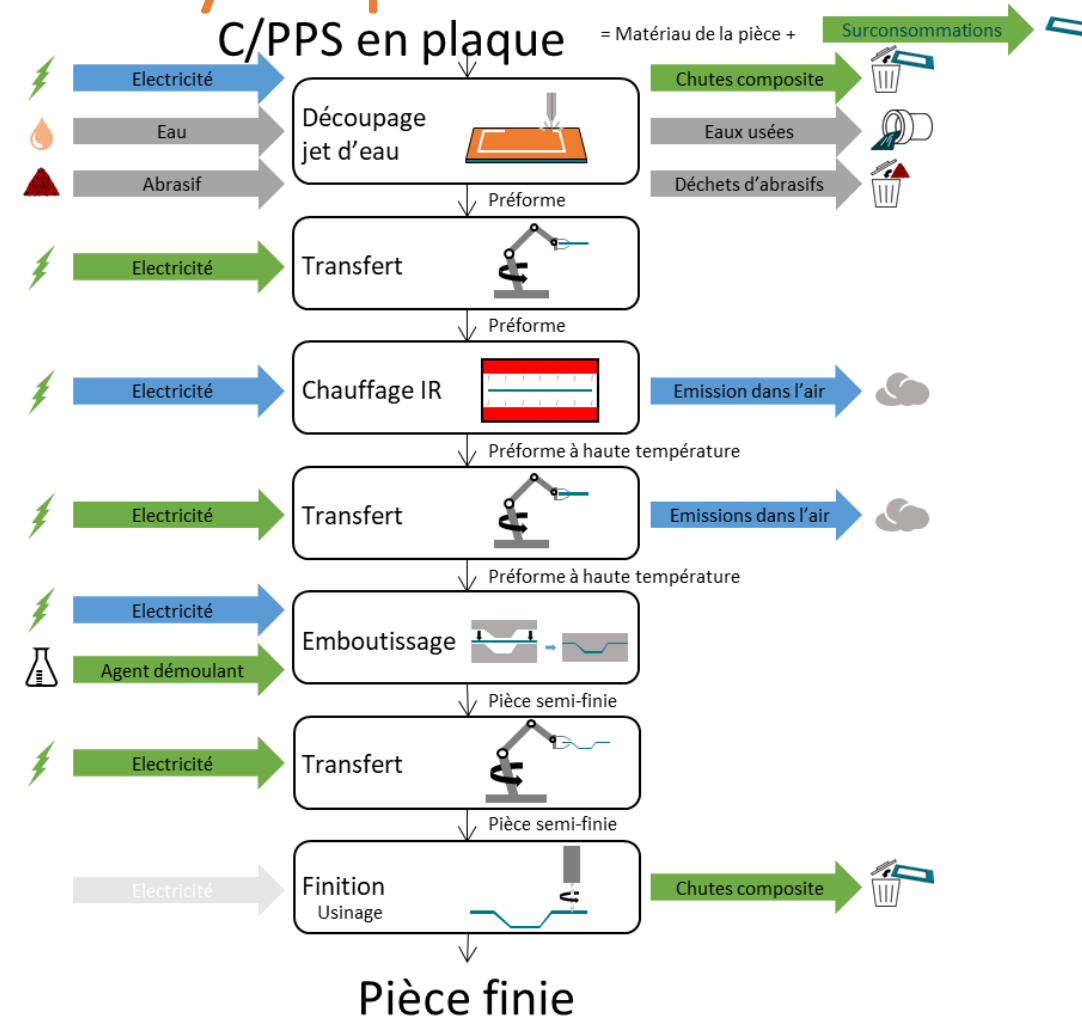
Surconsommations

Méthode de collecte de données :

→ : Mesures

→ : Littérature

→ : Spécifications machine



Analyse quantitative des flux

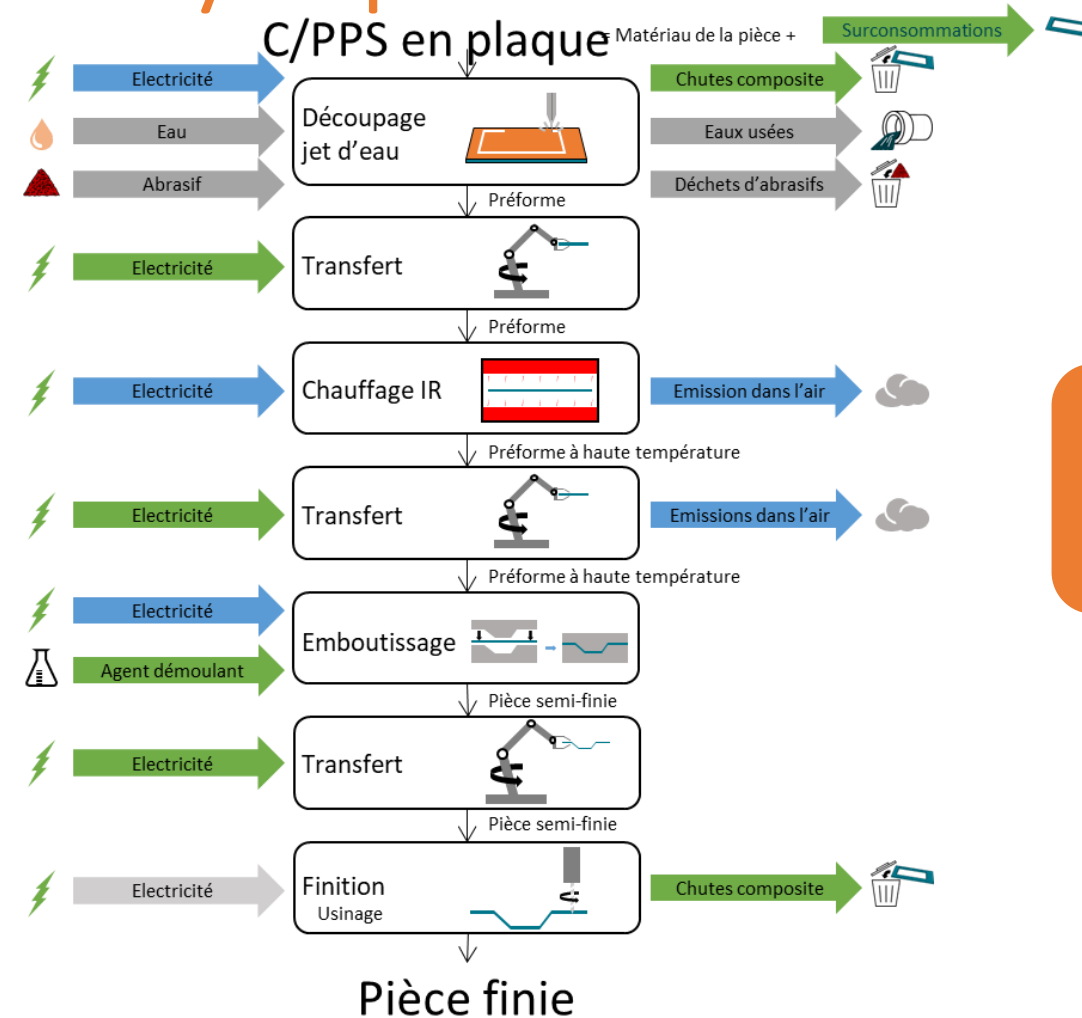
Méthode de collecte de données :

→ : Mesures

→ : Littérature

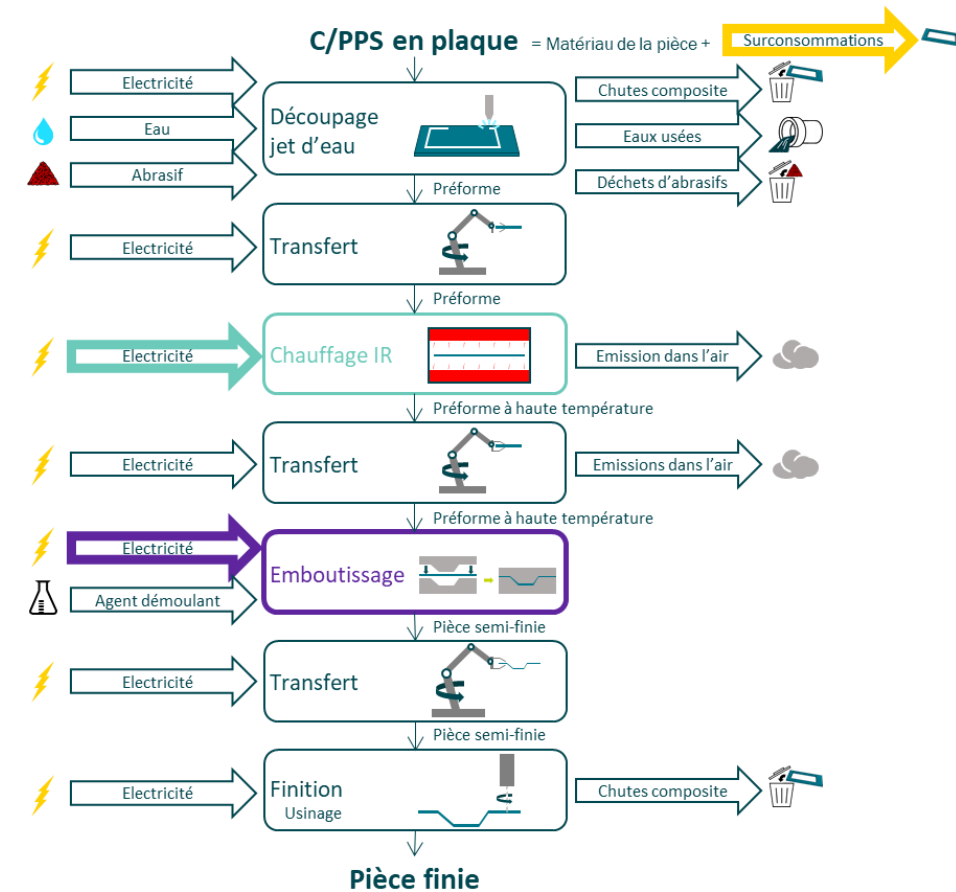
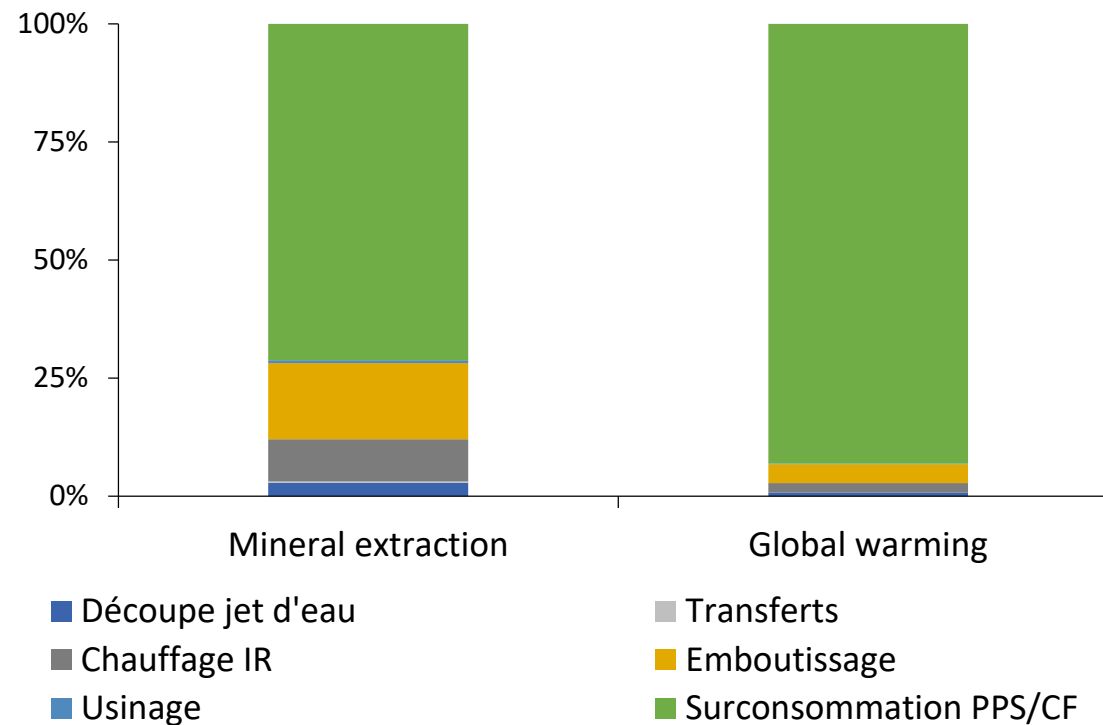
→ : Spécifications machine

→ : Ecoinvent



A partir des données d'inventaire collectées :
Flux d'inventaire = f (paramètres)

Résultats en impacts environnementaux



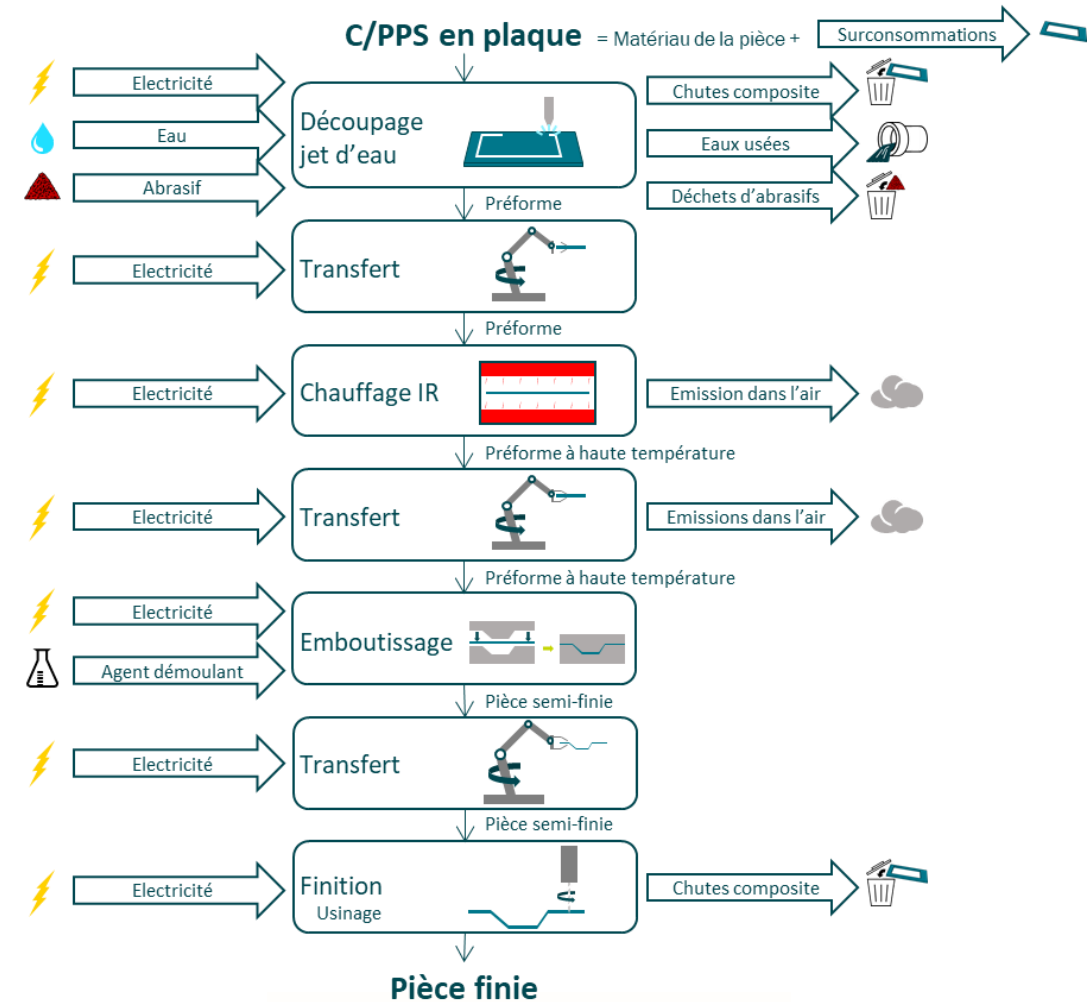
Couplage avec une évaluation économique

Périmètre basé sur **le même arbre des processus** :

$$\text{Cout} = \sum \text{Flux inventaire} \times \text{facteur de cout}$$

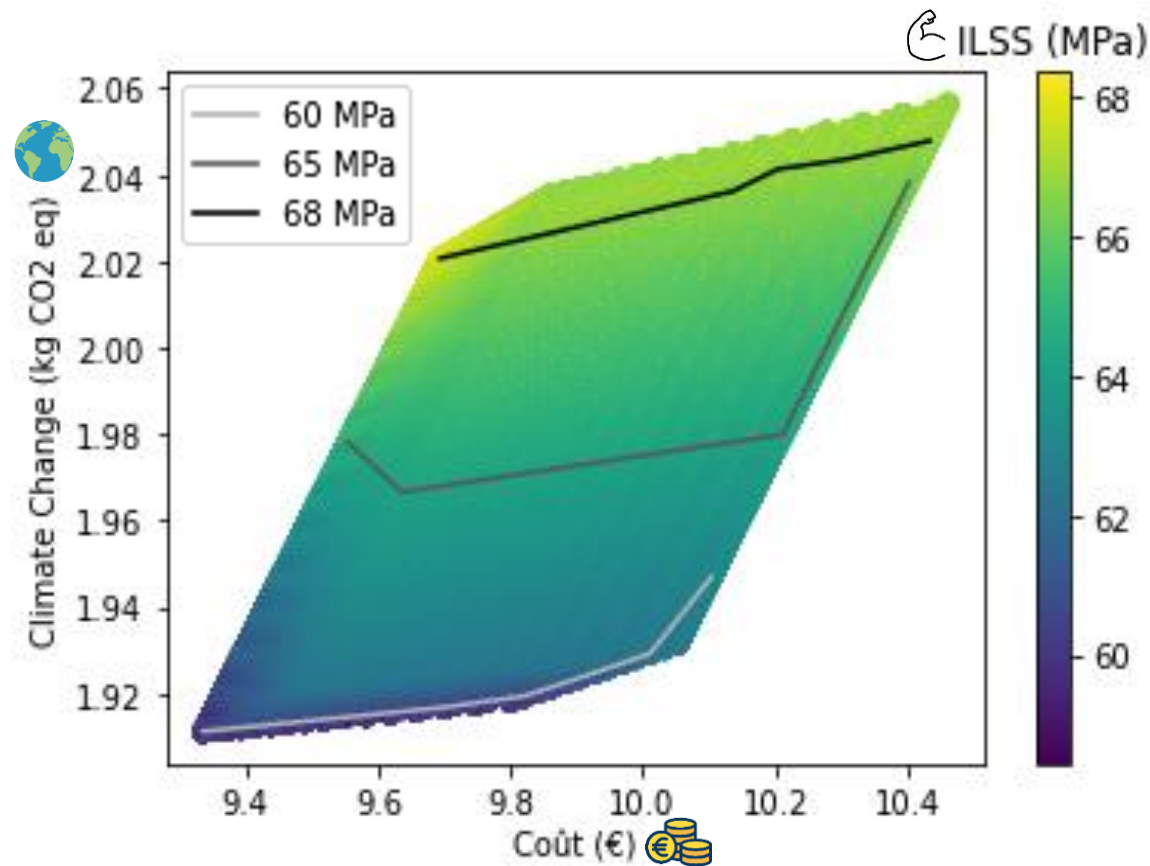
Avec Flux d'inventaire = f(paramètres procédé)

Flux d'inventaire	Donnée
Energie électrique	0,085 €/kWh
Eau	3,98 €/m ³
Abrasifs (grenats)	0,7 €/kg
Traitement des déchets	64 €/t
Agent démoulant	41,7 €/L
Surconsommations de matériau	38 €/kg
Main d'œuvre	40,4 €/h



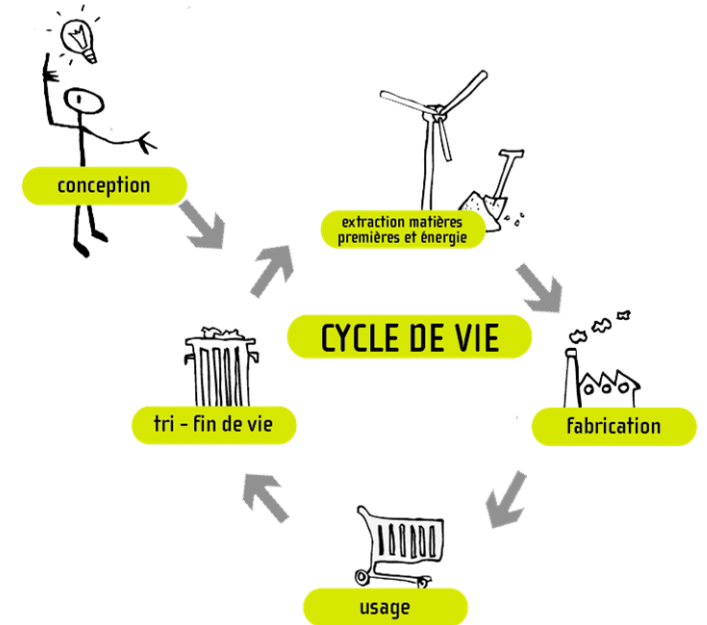
Vers l'optimisation multicritère

Exploitation de la courbe iso-qualité sur trace de la surface de réponse



Synthèse : ce qu'il faut retenir

- L'analyse environnementale des procédés propres consiste à caractériser quantitativement les flux élémentaires
 - L'énergie électrique
 - La consommation et le rejet de matériaux
 - La consommation et le rejet des fluides
- Pour l'ensemble du cycle de vie d'un produit
- Afin d'éviter les transferts d'impacts
- Des exemples existent en usinage, fabrication additive, mise en forme de composites.... Et de nombreux procédés innovants restent à caractériser dans une approche technico-économico-environnementale





Fin de la séance
suite : exercices !

Olivier Kerbrat, ENS Rennes
olivier.kerbrat@ens-rennes.fr
Bruno Lavis, Arts et Métiers
bruno.lavis@ensam.eu

