

Organisation de l'UEF « Energétique avancée » :

Partie **Machines thermiques** :

- Cycle thermodynamique de la climatisation
- Principe de fonctionnement d'un moteur à combustion interne
- Cycles thermodynamiques des moteurs
- Notions sur la combustion et la pollution
- **Bilan carbone pour les carburants**
- **Bilan carbone pour une entreprise**
- **Technologie des moteurs à combustion interne**



- 1 test de CM/ED de 1h (40%)

1 Introduction

Les émissions du dioxyde de carbone CO₂ (aussi appelé gaz carbonique) pose aujourd'hui et dans le futur des grands problèmes

- La teneur en CO₂ dans l'atmosphère a atteint des valeurs qui ont été atteintes la dernière fois il y a 3 à 5 millions d'années.
- Conséquence du CO₂ dans l'atmosphère : Réchauffement de la terre de 0,3 à 4,8 K selon les scénarios. Donc en 2070 un tiers de la population vivra dans des zones si chaudes et invivables comme le Sahara aujourd'hui.
- Autre conséquence de l'augmentation de la température : élévation du niveau moyen de la mer de 25 à 80 cm dû à la fonte des calottes de neige et des glaciers et 2/3 du Bangladesh submergé.
- En 2019 il y avait 20 millions de réfugies climatiques et on prévoit en 2050 250 millions.

- ► **Déjà aujourd'hui, des vagues de chaleur ont augmenté de 3,5 fois, des inondations de 2,5 fois, ... au cours des 40 dernières années :**

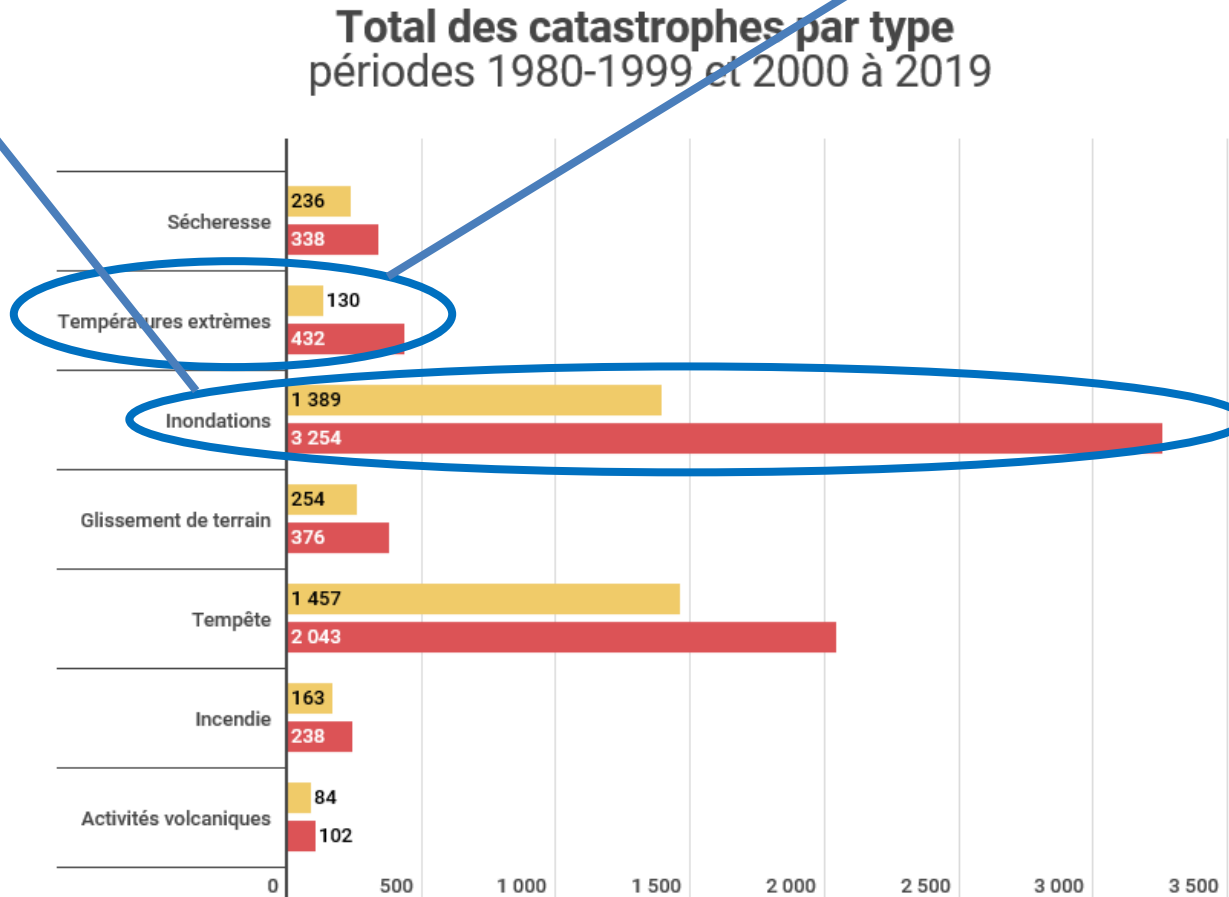
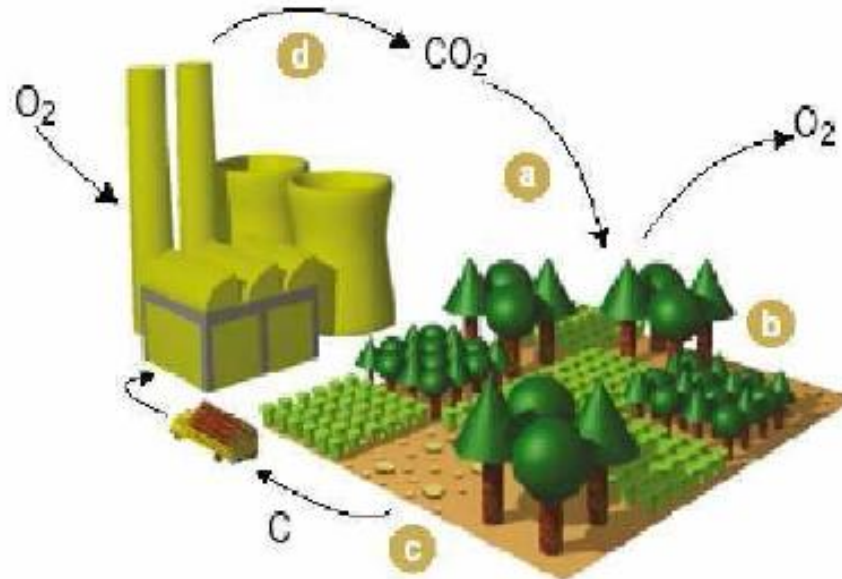


Figure : Augmentation des catastrophes au cours des 40 dernières années (ONU)

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

Les agrocarburants (ou biocarburants) :

Les agrocarburants sont issus des matières végétales (biomasse) qui utilisent pour leur croissance le gaz carbonique présent dans l'atmosphère grâce au processus de la photosynthèse. Donc le gaz carbonique qui est produit quand on brûle les agrocarburants est à nouveau absorbé par la végétation utilisée pour la production des agrocarburants. En théorie, les agrocarburants ne génèrent donc pas de gaz carbonique.



Les agrocarburants sont déjà sur le marché et peuvent être achetés dans certaines stations-service . Le bioéthanol remplace l'essence et le biodiesel le gazole .

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ I. Prendre en compte toutes les étapes

Afin d'évaluer si les agrocarburants diminuent les émissions du CO₂ une méthodologie basée sur le concept de l'analyse de cycle de vie (ACV ; norme ISO 14040 à 44 ; en anglais : Life cycle analysis (LCA)) est utilisée. Cette méthode, appelée « du puits à la roue » ou « Well to Wheel (WtW) », repose sur l'étude de l'ensemble des étapes élémentaires d'une filière allant de l'obtention des matières premières à l'élaboration d'un produit jusqu'à la fin de vie du produit étudié (recyclage, valorisation thermique ou encore mise en décharge) :

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ I. Prendre en compte toutes les étapes

1) Production de la ressource :

- extraction/production du pétrole brut dans le cas des carburants pétroliers ;
- culture, récolte et collecte de la biomasse dans le cas des agrocarburants

2) Transport de la ressource : étape de transport de la ressource depuis le lieu de production jusqu'au lieu de transformation de cette ressource en carburant

3) Transformation de la ressource en carburant :

- raffinage du pétrole brut en essence ou gazole dans le cas des carburants pétroliers ;
- raffinage de la biomasse en bioéthanol ou biogazole pour les agrocarburants

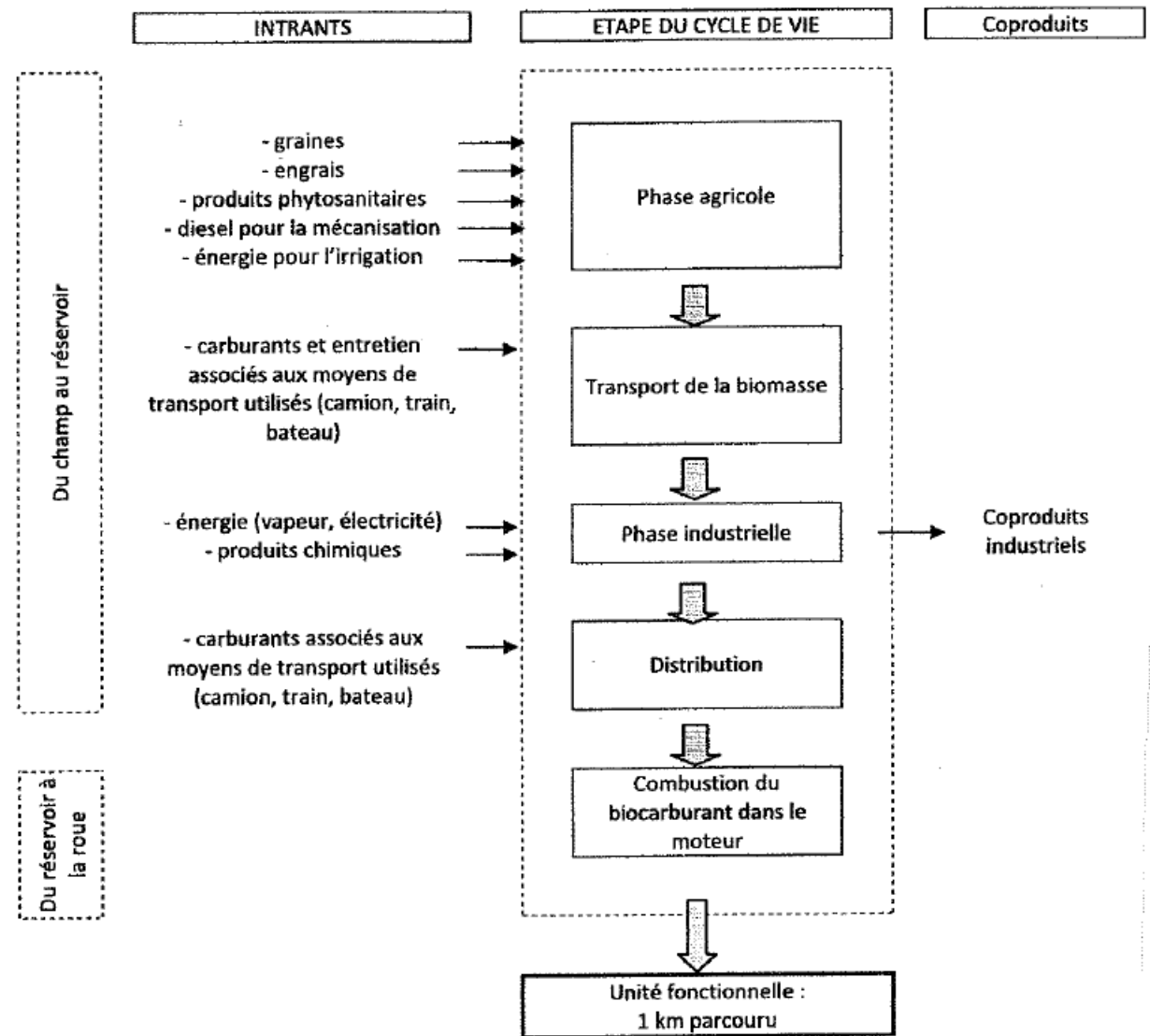
4) Utilisation du carburant : combustion du carburant dans le moteur pour parcourir le cycle européen normalisé avec une voiture.

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ II. Prendre en compte l'impact des Intrants et Sortants (Impact négatif)

Il est important de préciser que les étapes d'approvisionnement en matières auxiliaires (production d'engrais par exemple) et énergie auxiliaire (production et transport de l'électricité par exemple) ainsi que celle du traitement des « déchets » sont également prises en compte :

→ II. Intrants et Sortants



2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ III. Prendre en compte l'impact des coproduits (Impact positif)

Dans le cas de la production des agrocarburants, plusieurs coproduits de natures très distinctes sont générés en quantités importantes : en moyenne 1,5 tonnes de coproduits par tonne d'agrocarburant. Par exemple, au cours de la production de biogazole (EMHV) à partir d'huile végétale de colza sont également produits pailles, tourteaux (dédiés à l'alimentation animale) et glycérine. Certaines études ignorent ces coproduits, mais la grande majorité les comptabilisent .

Une des possibilités est d'affecter les impacts (émissions de CO₂ ; consommation d'énergie fossile pour la transformation) aux différents produits au prorata de leurs valeurs économiques, de leurs masses ou encore de leurs contenus énergétiques (PCI*masse) :

→ III. Coproduits (Impact positif) Production de 1 l de biogazole = 0,7 kg de CO₂

- au biogazole :

$$0,65 * 0,98 * 1 * 0,94 * 1 \\ * 0,7 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \\ = 0,42 \text{ kg}_{\text{CO}_2}$$

- au coproduit
« tourteau » :

$$0,35 * 0,7 \text{ kg}_{\text{CO}_2} \\ = 0,245 \text{ kg}_{\text{CO}_2}$$

Etape	produit intermédiaire	Masse valorisée		PCI MJ/kg ms	Calcul	facteur d'allocation
	coproduit					
Culture -> trituration	huile brute	0,44	kg hb/kg gr	36,0	$(0,44*36)/(0,44*36+0,49*17,1)$	65%
	<u>tourteau</u>	0,49	kg trt/kg gr	17,1	$(0,49*17,1)/(0,44*36+0,49*17,1)$	35%
Semi-raffinage	huile neutre	0,98	kg hn/kg hb	36,0		98%
	huiles acides	0,02	kg ha/kg hb	36,0		2%
Wintérisation	huile neutre pure					100%
Estérification	biodiesel	0,99	kg bc/kg hn	37,2		94%
	glycérine	0,12	kg gl/kg hn	16,6		5%
	huiles acides	0,01	kg ha/kg hn	36,0		1%
Distribution	<u>biodiesel</u>				100%	100%

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ III. Prendre en compte l'impact des coproduits (Impact positif)

Une seconde méthode dite « méthodes des impacts évités » est également employée : elle consiste à affecter l'intégralité des impacts au seul agrocarburant et à retrancher de cette valeur un « credit » correspondant aux impacts qu'aurait générés la production de la même quantité de coproduit par sa voie classique de fabrication .

Exemple : si on considère que la glycérine coproduite lors de la production du biogazole se substitue à une glycérine produite dans l'industrie chimique, on utilisera le bilan de cette dernière filière pour calculer le crédit à allouer au biogazole. Admettons qu'on obtient 0,12 kg de glycérine pendant la production d'1 l de biogazole et la production de 0,12 kg de glycérine dans l'industrie chimique engendre une émission de CO₂ de 0,05 kg_{CO2}. Dans ce cas les 0,7 kg de CO₂ engendré pendant la production d'1 l de biogazole sont diminués de 0,05 kg_{CO2} : le biogazole n'engendre donc plus que 0,65 kg_{CO2}. On fait pareil pour le tourteau et les huiles acides et on obtient la valeur finale pour la masse de CO₂ émis pour la production d'1 l de biogazole.

Bien que la méthode du prorata soit la plus facile à mettre en œuvre, la méthode des impacts évités est la méthode la plus juste.

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ IV. Prendre en compte l'impact des coproduits (Impact négatif)

La démarche consiste à lister et quantifier les flux entrants (matières, énergie, ...) et sortants (produits, rejets, ...) de chacune des étapes du cycle de vie et à calculer ensuite l'impact possible de ces consommations et émissions sur l'environnement. Par exemple pour **le bilan des gaz à effet de serre** on comptabilise les trois principaux gaz à effet de serre : le CO_2 d'origine fossile, le méthane CH_4 et le protoxyde d'azote (N_2O). Le bilan total est exprimé en **kg de CO_2 équivalent ($\text{kg}_{\text{éqCO}_2}$)** en utilisant des facteurs de conversion (appelés **Pouvoirs de réchauffement globaux PRG**) traduisant l'effet de chacun de ces gaz à effet de serre sur 100 ans comparativement au CO_2 . Les résultats sont ensuite présentés en **$\text{kg}_{\text{éqCO}_2} / \text{km}$** (bilan émission CO_2) ou en MJ / km (bilan de consommation d'énergie fossile).

VOTE :

Question A :

Qu'est-ce qu'est un coproduit avec un impact positif :

- 1) tourteaux,
- 2) méthane
- 3) électricité
- 4) glycérine

Question B :

Quelle méthode est la plus juste pour prendre en compte les coproduits avec impact positif

- 1) affecter des émissions au prorata de leur masse,
- 2) affecter des émissions au prorata de leur valeur économique
- 3) affecter des émissions au prorata de l'émission de CO₂ pendant la production du coproduit

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ V. Contexte géographique

La définition du cadre de l'étude nécessite également la définition d'un contexte géographique et temporel : Par exemple consommer 1 kWh d'électricité en France représente une émission de 100 g CO₂ (80 % issus des centrales nucléaires) par rapport à la consommation de 1 kWh en Allemagne représentant 500 g CO₂ (50 % issus des centrales à carburant fossile). Par ailleurs, les pratiques d'aujourd'hui ne sont pas nécessairement celles de demain : le bilan d'effet de serres des filières européennes de production de bioéthanol pourrait être grandement amélioré par l'usage de combustibles renouvelables comme énergie auxiliaire.

Les points énoncés dans les paragraphes précédents expliquent les écarts observés entre les différentes études d'évaluation des agrocarburants. Ils expliquent qu'on ne peut pas obtenir les mêmes chiffres du bilan environnemental pour le bioéthanol fabriqué au Brésil par rapport à celui des Etats-Unis ou de l'Europe.

2 Démarche pour établir un bilan carbone (exemple : agrocarburants)

→ VI. Bilan carbone

	Emission de gaz à effet de serre [kg _{éq} CO ₂ /km]	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence
Essence	0,198	0 %
Ethanol (issu de maïs)	0,096	52 %
Ethanol (issu de blé)	0,11	44 %
Ethanol (issu de betteraves)	0,075	62 %
Ethanol (issu de la canne à sucre)	0,064	68 %

VOTE :

Question A :

L'utilisation du bioéthanol (1^{ière} génération) conduit à une réduction des émissions de CO₂ de :

1) pas de réduction,

2) 45 à 60 %

3) 60 à 70 %

4) 100 %

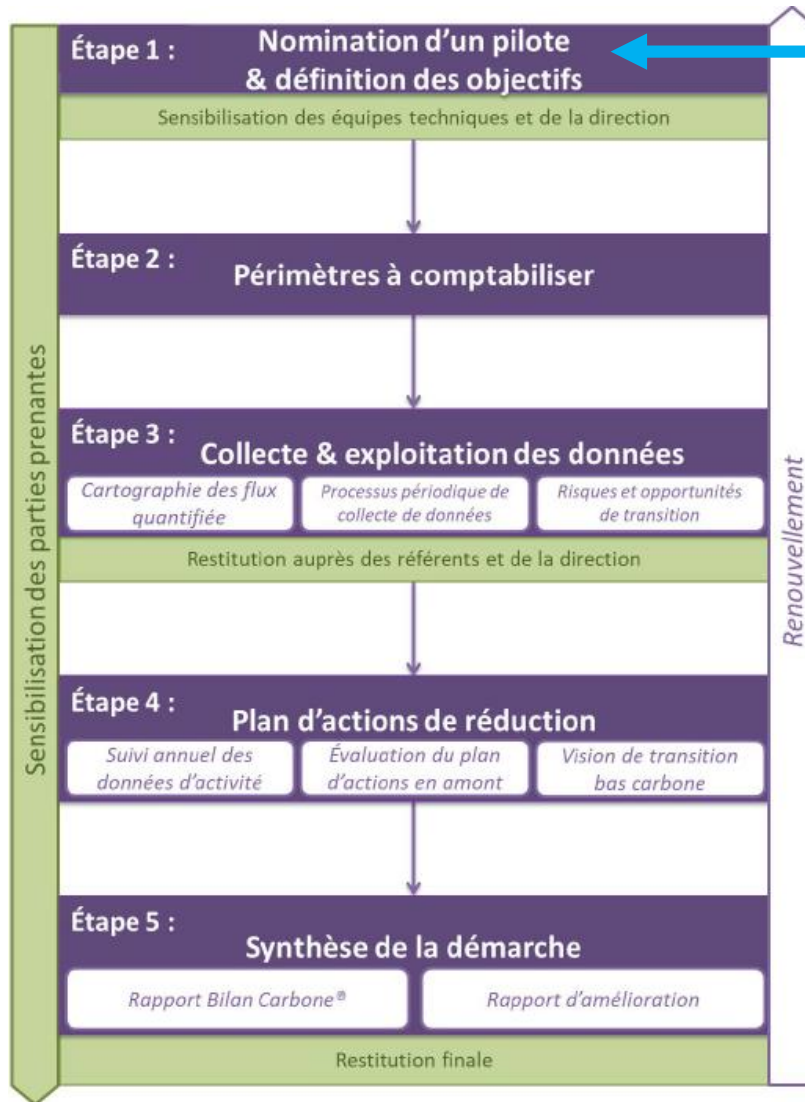
3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise

Le **fichier Excel « Bilan Carbone® »**, développé par l'ADEME, vise **à évaluer et réduire les émissions des GES** (H₂O, CO₂, N₂O, CH₄) pour des entreprises.

Fichier Excel « Bilan Carbone® » (Emissions de CO₂ dues à la consommation de l'énergie) :

Comptabilisation directe des combustibles																
1 - Combustibles fossiles, sources fixes	Rappel Emissions kg CO2e	Caractérisation du matériel	Conso (kg)	kgCO2e/kg		kgCO2e/kWh PCI		kgCO2e/tep PCI		kgCO2e/litre		kg CO2e mont	kg CO2e combustion			
				mont	combustion	Conso (kWh PCI)	mont	combustion	Conso (tep PCI)	mont	combustion			Conso (litres)	mont	combustion
Butane & Propane																
Butane (inclus maritime), Europe, Base Carbone	0			0,51	3,02		0,040	0,230		448	2 680		0,281	1,760	0	0
Propane (inclus maritime), France continentale, Base Carbone	0			0,49	2,97		0,039	0,233		445	2 720		0,256	1,540	0	0
Autres Gaz																
Gaz naturel - 2015 (mix moyen consommation), France, Base Carbone	12 538	Opéré				55 308	0,040	0,187		462	2 180				2 196	10 343
Gaz d'aciérie, France continentale, Base Carbone	0														0	0
Liquides																
Fioul domestique, France continentale, Base Carbone	357 610	Opéré		0,68	3,17		0,053	0,272		529	3 170	110 000	0,571	2,680	62 810	294 800
Fioul domestique, France continentale, Base Carbone	0			0,68	3,17		0,053	0,272		529	3 170		0,571	2,680	0	0
Charbons																
Agglomérés de houille, France continentale, Base Carbone	0			0,28	3,07		0,032	0,345		372	4 020				0	0
Tourbe, France continentale, Base Carbone	0			0,10	1,28		0,032	0,398		373	4 640				0	0
Coke & Déchets																
Coke de houille, France continentale, Base Carbone	0			0,25	3,03		0,032	0,389		372	4 540				0	0
Pneumatiques usagés non réutilisables - poids lourds, France	0														0	0
Total	370 148														65 006	305 143

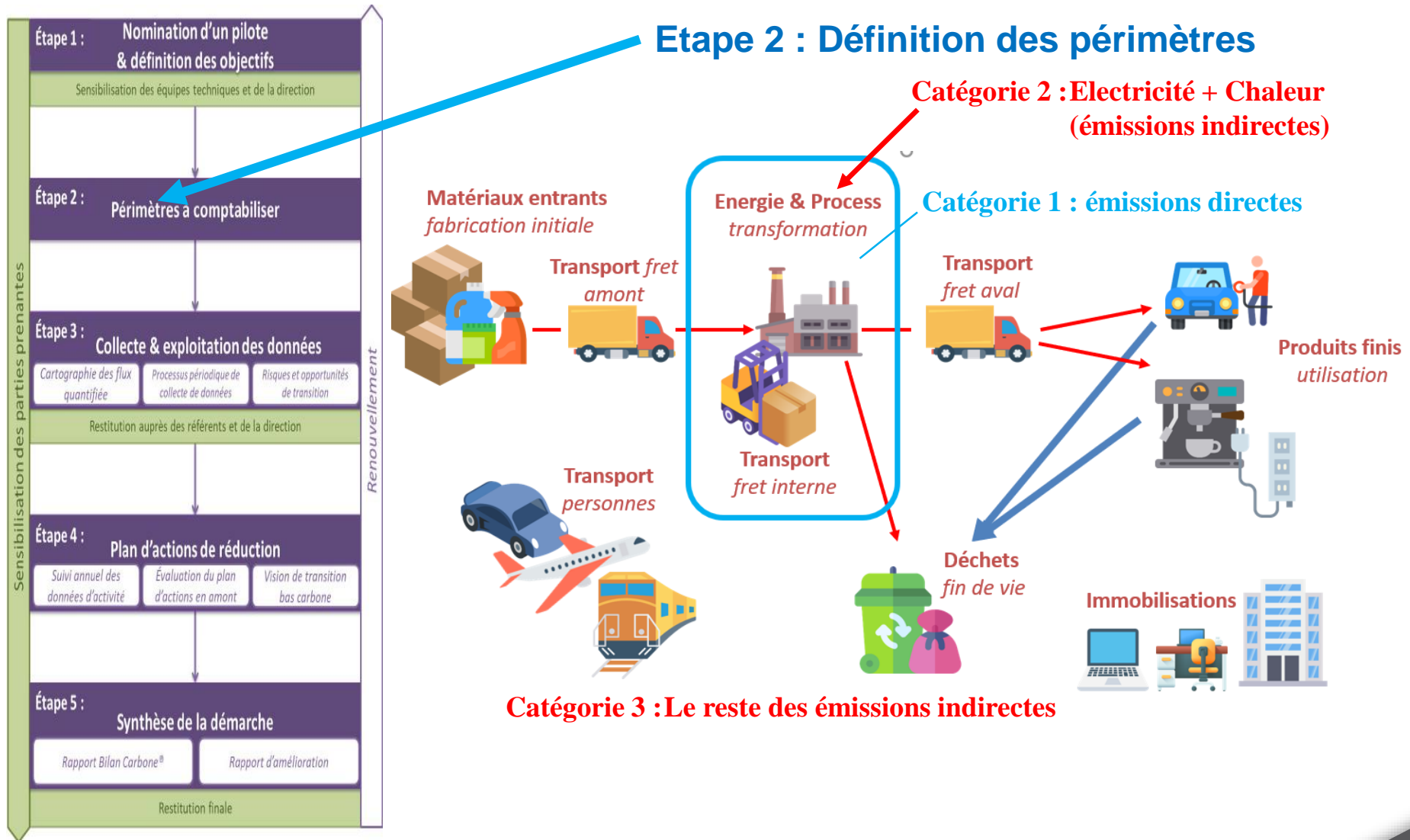
3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Étape 1 : Pilote & objectifs

- Désignation d'un pilote du Bilan Carbone
 - Identification des objectifs et des motivations
- afin de faire adhérer
- les décideurs,
 - les détenteurs de données et
 - l'ensemble de salariés

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise

Etape 2 : Définition des périmètres

Le **périmètre organisationnel** prend en compte

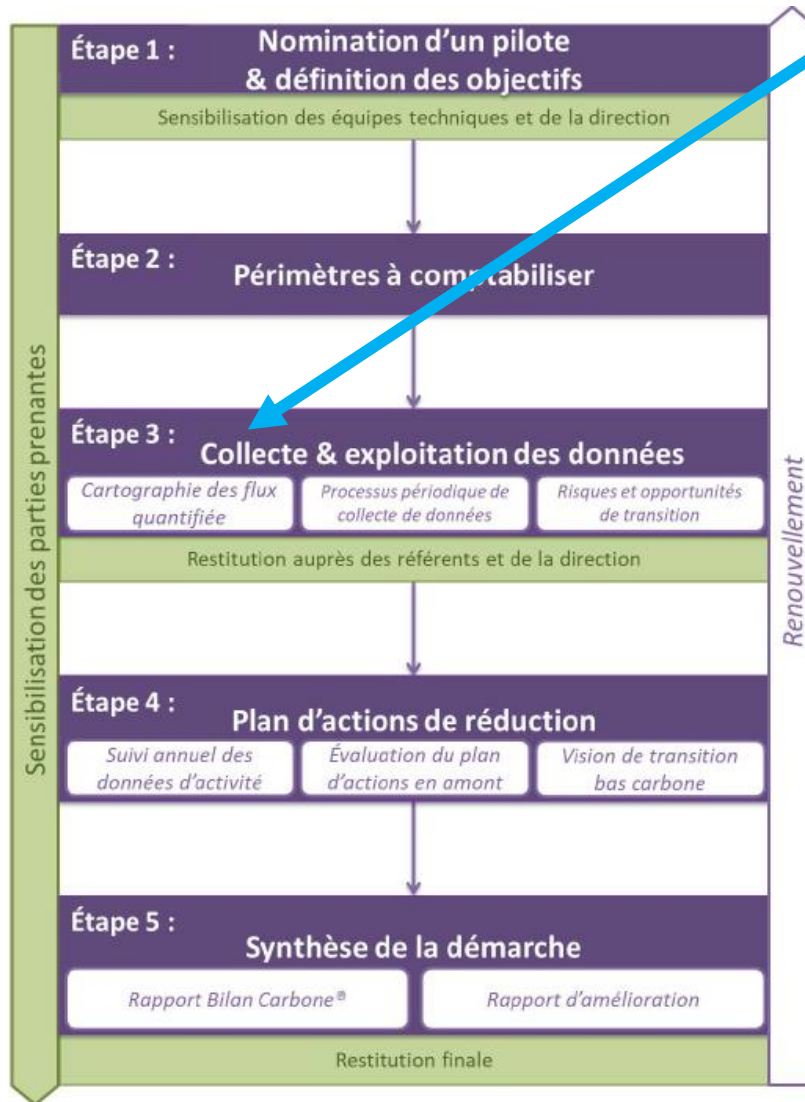
- les **émissions directes** : émissions de GES à l'intérieur de l'entreprise (par exemple : combustion du gaz naturel pour le chauffage de l'entreprise)

Le **périmètre opérationnel** prend en compte en plus

- les **émissions indirectes** : émissions de GES, conséquence des activités de l'entreprise mais émis à l'extérieur de l'entreprise (par exemple : Electricité consommée, matières achetées, déchets, produits fabriqués, ...)

Émissions directes	Sources fixes de combustion
	Sources mobiles de combustion
	Procédés hors énergie
	Fugitives
	Utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF)
Émissions indirectes	Consommation d'électricité
	Consommation de vapeur, chaleur ou froid
	Énergie consommée importée à travers un réseau physique à l'exclusion de l'électricité
	Achat de produits
	Immobilisation
	Déchets
	Transport de marchandises amont
	Déplacements professionnels
	Actif en leasing amont
	Investissement
	Transport des clients et visiteurs
	Transport de marchandises aval
	Utilisation des produits vendus
	Fin de vie des produits vendus
	Franchises en aval
	Actif loués en aval
	Trajets domicile-travail des employés
Autres émissions non incluses dans les postes précédents	

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Étape 3 : Collecte des données

➤ Données internes :

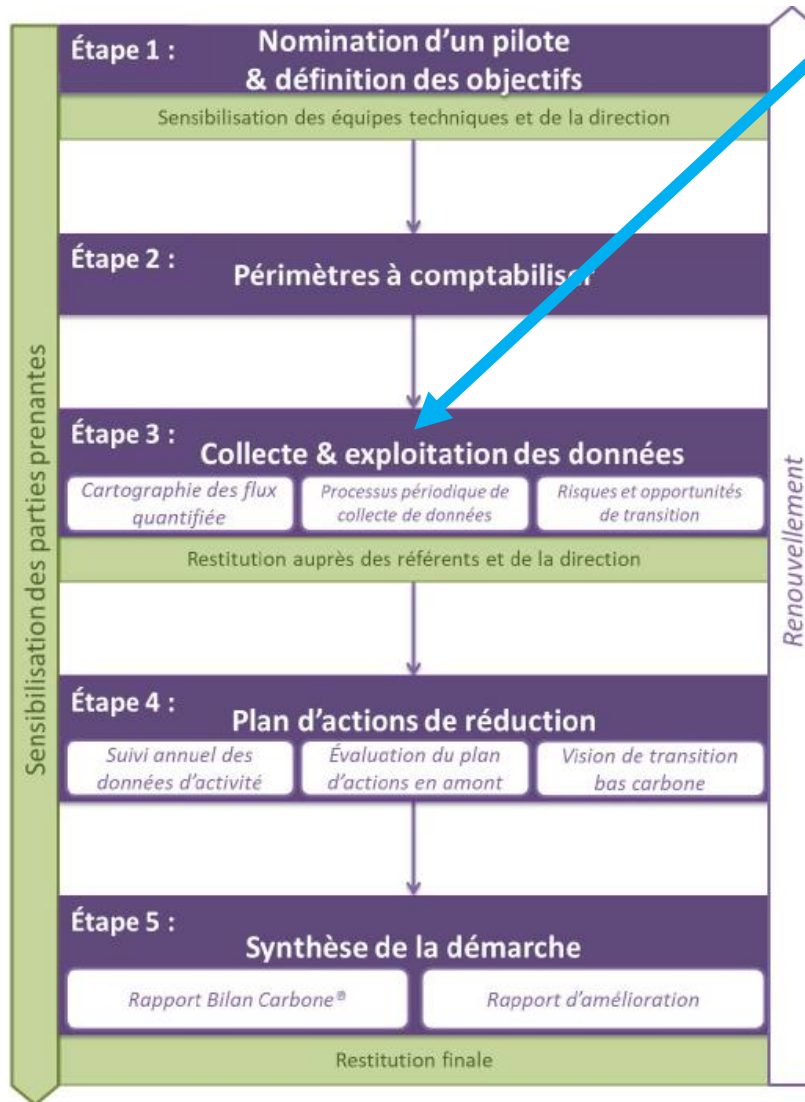
- des factures
- des bons de commande
- des devis de livraison

et toujours bien documenter la source des données

➤ informations externes, par exemple

- Type de véhicule utilisé par le transporteur
- Méthode de traitement des déchets produits par l'entreprise

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Étape 3 : Exploitation des données

Transformation des données (collectées) en quantité d'émissions de GES :

$$\text{Emission de GES} = \text{Donnée collectée} \times \text{Facteur d'émission}$$

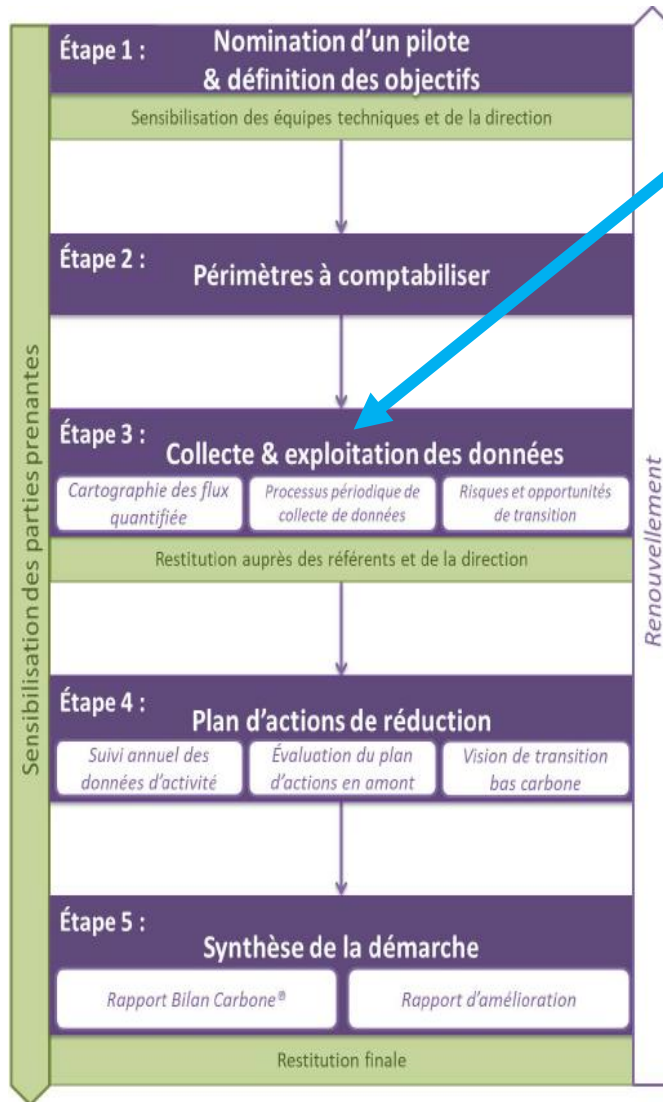
Exemple pour une voiture à essence :

$$\begin{aligned} \text{Emission de GES} &= \text{Déplacement } 254 \text{ km} \times 0,198 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{km} \\ &= 50,3 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2} \end{aligned}$$

voir poly p.9 :

	Emission de gaz à effet de serre [kg _{éqCO₂} /km]	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence
Essence	0,198	0 %

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Étape 3 : Classement en postes d'émission :

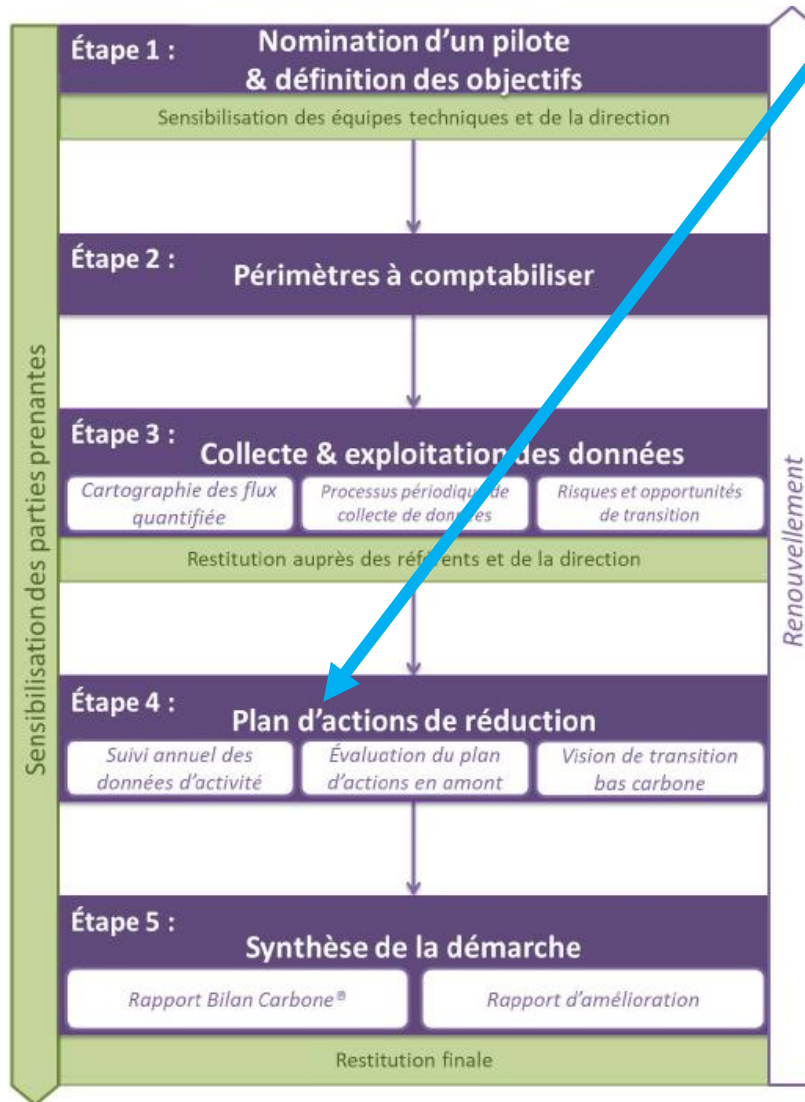
Poste d'émission	Exemple	Cause de l'émission de CO ₂
Energie	Fioul, électricité	- Pendant la combustion - Fabrication et transport du combustible
Hors énergie	Gaz dans l'installation de climatisation	Fuites
Intrants	Acier	Fabrication des barres d'acier
Futurs emballages	Cartons	Fabrication et élimination de l'emballage
Déchets directs	Copaux d'acier issus de l'usinage des barres d'acier	Elimination des copaux
Fret	Par camion, bateau	- Pendant la combustion - Fabrication et transport du combustible - Fabrication du camion
Déplacements	- Trajet domicile – travail - Dans le cadre du travail	- Pendant la combustion - Fabrication et transport du combustible - Fabrication de la voiture
Immobilisations	Bâtiments, machines de production, véhicules	Fabrication du bâtiment
Utilisation	Consommation d'électricité pendant l'utilisation du produit	Fabrication et transport de l'électricité
Fin de vie	Acier, PVC à la fin de vie du produit	Elimination du produit

Cat. 1
ou 2

Cat. 1

Cat. 3

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Etape 4 : Plan d'actions

Par exemple : remplacer la voiture à essence par une voiture à bioéthanol

Emission de GES

$$= \text{Déplacement } 254 \text{ km} \times 0,096 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{km}$$

$$= 24,3 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}$$

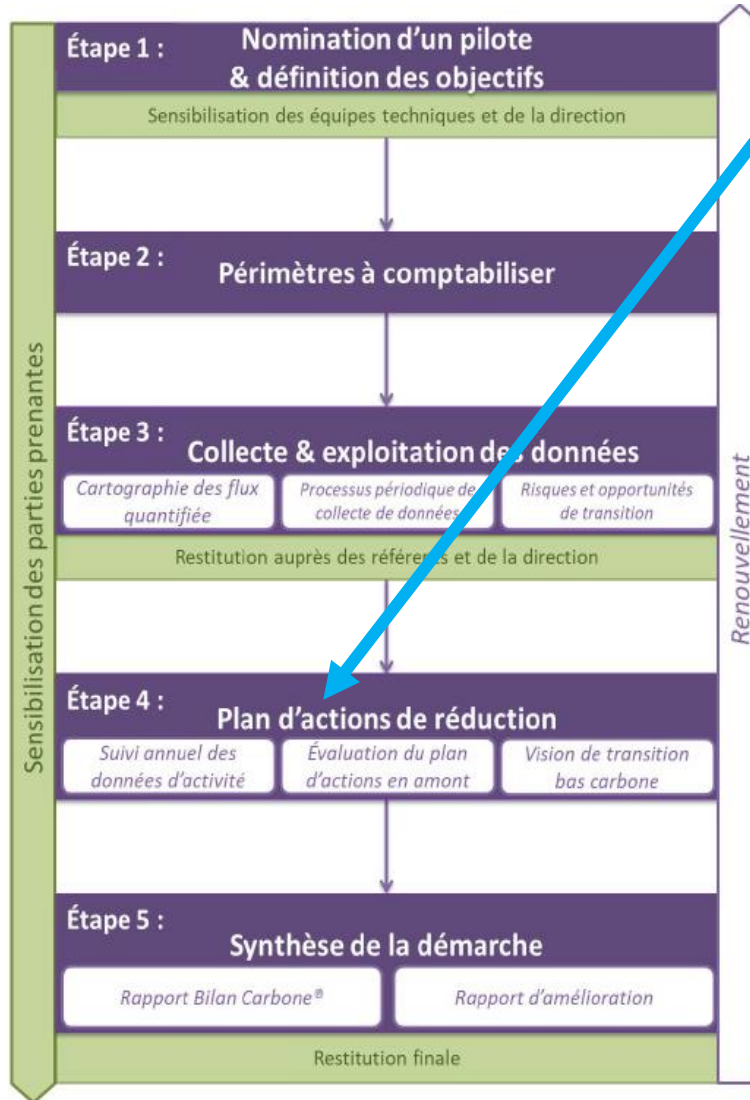
voir poly p.9 :

	Emission de gaz à effet de serre [kg _{éqCO₂} /km]	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence
Essence	0.198	0 %
Ethanol (issu de maïs)	0,096	52 %

Gain par rapport à une voiture d'essence :

$$50,3 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2} - 24,3 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2} = 26,0 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}$$

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise

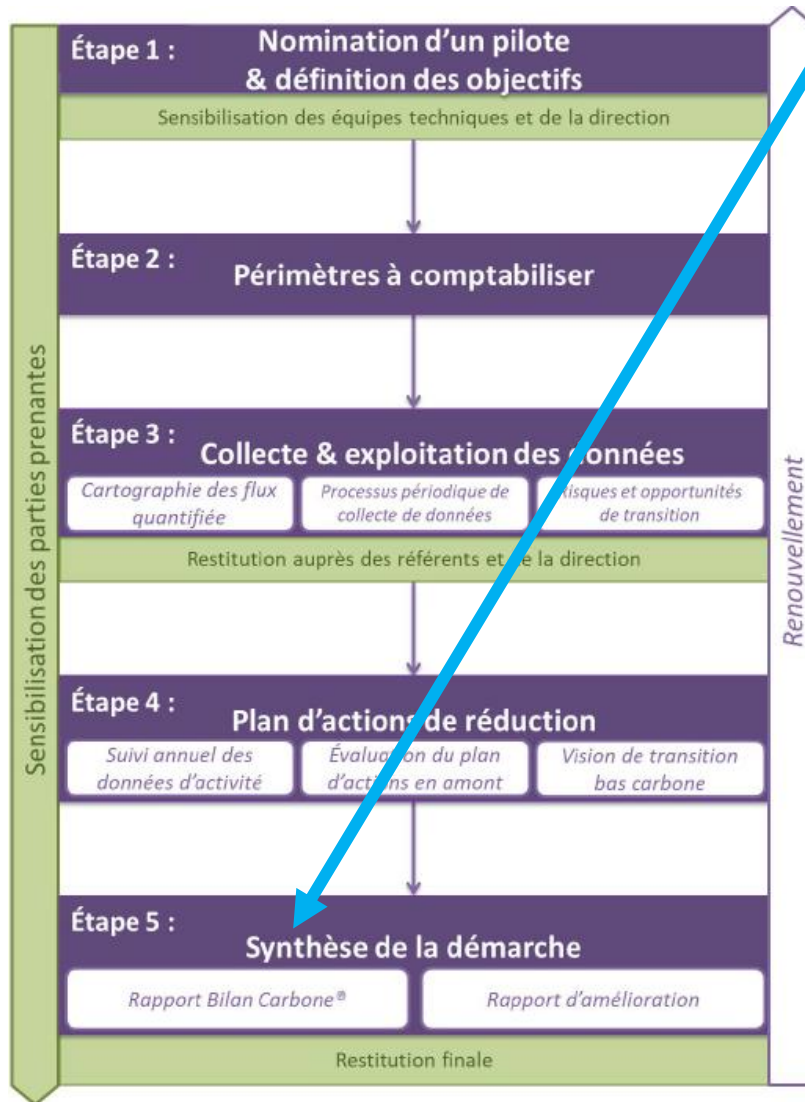


Étape 4 : Plan d'actions

Organisation :	
Type	AXE 1 : Texte par rapport à l'axe action
Prioritaire	Remplacer la chaudière fioul par chaudière biomasse
Réfèrent - Porteur de l'action	
François	
Objectifs de l'action	Type d'actions
	Sensibilisation
	Sobriété X
	Efficacité
	Amélioration de la comptabilité
Cible(s)	
Cible 1	
APPROFONDISSEMENTS	
Calendrier prévisionnel	Délais d'exécution
	6 mois
Objectifs de réalisation pour la fin de la période	
Coûts estimés	Gain GES estimé (% de réduction par rapport à la référence)
12 345 €	30%
Indicateur(s) de suivi de l'action	Indicateur(s) de résultat de l'action
Indicateur 1	
Signature de la direction	Signature du référent de l'action

Le plan d'actions doit énoncer **chaque action, mais aussi son objectif, le porteur de l'action, le calendrier prévisionnel de l'action, le coût, la quantité d'émissions de GES réduite et sa priorité.**

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise

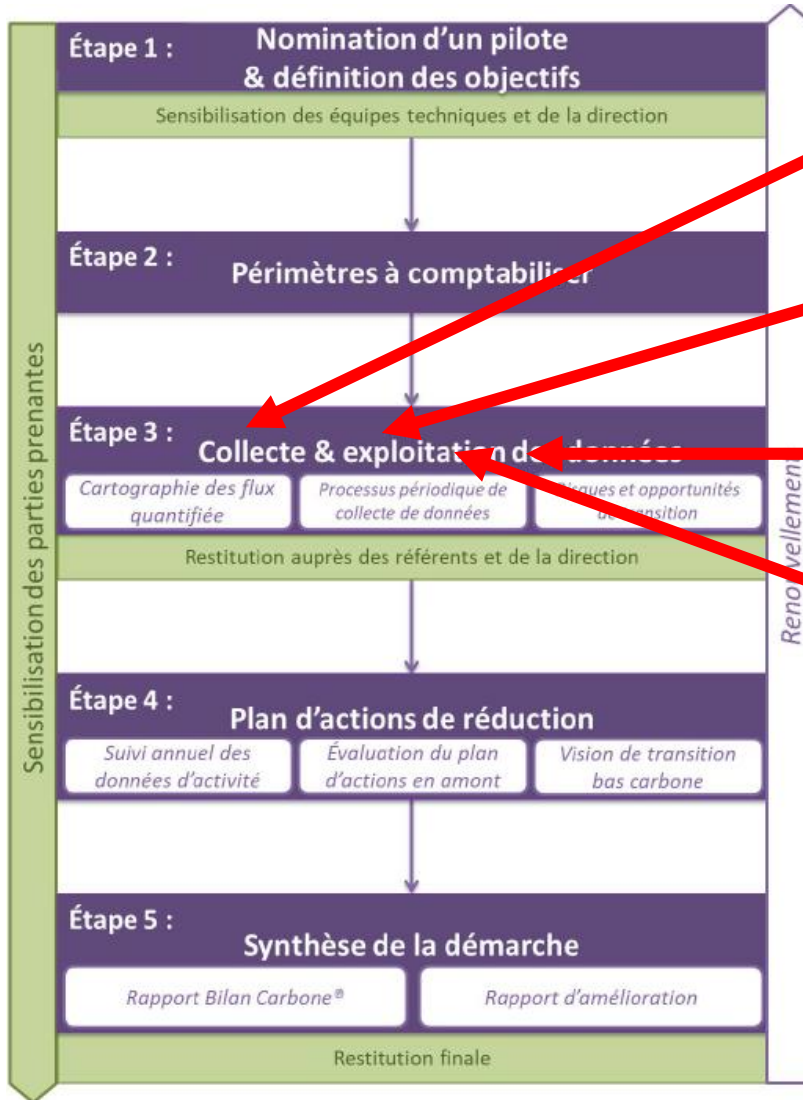


Etape 5 : Synthèse

➤ Document de synthèse

- Enjeux du changement climatique
- Objectifs du Bilan Carbone
- Description du processus de collecte des données
- Quantification des émissions de GES
- Plan d'action

3 Démarche pour établir un bilan carbone pour une entreprise



Difficultés :

- Collecte des informations externes
- Etendue de la base de données
- Certains facteur d'émission flous
- Fiabilité des facteurs d'émission