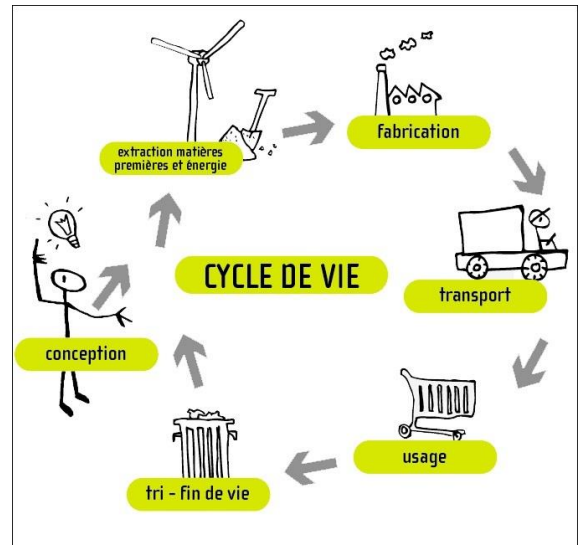
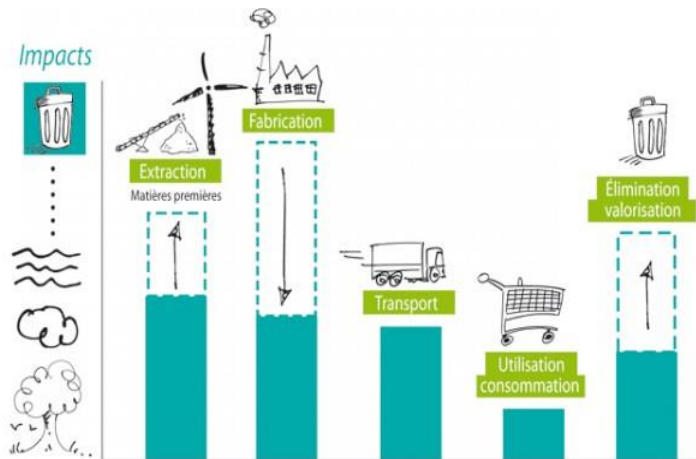


Analyse du Cycle de Vie d'un produit et Ecoconception

HISTOGRAMME DE L'ECO-CONCEPTION D'UN PRODUIT





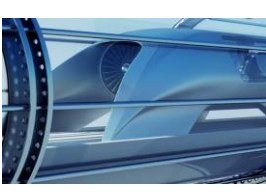


L'objet de ce chapitre est de définir le vocabulaire et les outils nécessaires à la description externe des systèmes pluritechniques (ou multiphysiques). Il s'agit aussi de prendre en compte les exigences liées au développement durable et sensibiliser aux aspects sociétaux.

1. Motivations et problématique

1.1. Enjeux et contexte

9 milliards d'hommes et de femmes vivront en 2050, dont 75% dans les villes.
Les grands enjeux du 21^{ème} siècle seront :

Accès à la santé	Accès à l'énergie	Accès à la communication	Accès à l'eau et à la nourriture	Accès aux transports
				
Robot Davinci	Hydrolienne	Projet Starlink	Projet Agricoool	Projet Hyperloop

Comme nous le verrons ensuite, nous consommons toujours plus d'énergie, que ce soit pour le transport, les nouvelles technologies, nécessitant toujours plus de données numériques à échanger, stocker...

Par exemple, un « datacenter » regroupant 80000 serveurs, qui réceptionnent, traitent et stockent une partie des milliards de données informatiques (recherches, mails, vidéos, photos, etc.) transitant chaque seconde sur le Web, a besoin énormément d'énergie (14 MW), ce qui représente la consommation d'une ville d'environ 40000 habitants...

De l'électricité, il en faut pour alimenter les ordinateurs, bien sûr, mais aussi pour refroidir les salles et les équipements (photo ci-contre), afin d'éviter une surchauffe et un dysfonctionnement des machines...

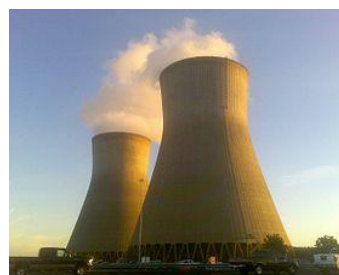
Ces « datacenters », qui consomment 2 % de l'énergie mondiale, entraînent de larges émissions de CO₂. Dans de nombreux pays, l'électricité vient du charbon et du nucléaire.



1.2. Toute production ou transformation nécessite de l'énergie

On peut dire que le monde n'est qu'énergie... Plus le monde autour de nous se transforme, plus il y a d'énergie mise en jeu... L'énergie, est une grandeur physique et on peut la définir comme quantifiant le changement d'état d'un système. Si on se ramène à des transformations de la vie courante, ou plus exactement, à des objets ou machines qui transforment l'environnement dans la vie courante, on pourra, entre autres, citer :

- Les objets qui modifient la température : ils servent soit à réchauffer, soit à refroidir. Ils utilisent ou éventuellement restituent de l'énergie ;
- Les objets qui modifient la vitesse : tous les moyens de transport en font partie ;
- Les objets qui modifient la forme : enlèvement de matière, ajout de matière, modification de la géométrie, etc... ;
- Les objets qui modifient la composition chimique ;
- Les objets qui modifient la position dans un champ (magnétique, électrique, gravitationnel) ;
- Les objets qui modifient la composition atomique...



Toute transformation ou modification utilise de l'énergie : quelques exemples

Le premier principe de la thermodynamique est une loi de la physique essentielle : l'énergie se conserve. A cause de cette loi de conservation de l'énergie, on peut admettre qu'utiliser de l'énergie c'est en pratique extraire de l'énergie de l'environnement (où elle se situe déjà) et la transformer avec un convertisseur.

L'homme est lui-même un convertisseur qui convertit directement en son sein la biomasse et ses dérivées comestibles...

Aujourd'hui utiliser plus d'énergie revient à commander de plus en plus de machines.

Il existe un foisonnement d'unités pour quantifier l'énergie :

- Le joule : un français utilise en moyenne par an (directement ou indirectement) : 170 GJ ;
- Le kWh (1 kWh = 3,6 MJ) : un français utilise par an 50000 kWh ;
- La tonne équivalent pétrole (tep) et ses multiples (1 tep = 41,8 GJ = 11600 kWh).

Et bien d'autres, comme l'électronvolt...

Quelques comparaisons :

1 tep de bois	1 tep de charbon	1 tep de pétrole	1 tep de fission nucléaire	1 tep de fusion nucléaire
				
3,1 tonnes	1,4 tonnes	955 kg	240 mg	24 mg

Pour se donner des ordres de grandeurs, prenons deux exemples extrêmement simples.

- Le premier concerne une ampoule à incandescence de 100W allumée pendant une heure. Dans ce cas l'énergie consommée est de 100 W.h. C'est ce que produirait un cycliste de 85 kg (masse du vélo prise en compte) pédalant pendant 1h sur le plat entre 20 et 25 km/h...
- Si on suit le même exemple mais cette fois ci avec une machine thermique, on peut calculer (le rendement de la machine ou du moteur d'environ 30% étant pris en compte), 1 seul litre de carburant conduit à fournir 2 à 4 kWh d'énergie, cela reviendrait à utiliser 10 à 100 êtres humains qui utiliseraient soit leurs jambes, soit leur bras pour fournir le même travail.

Ce dernier exemple montre pourquoi le pétrole et les énergies fossiles ont constamment été développés depuis la révolution industrielle... Et pourtant avant la fin du 19^{ème} siècle, l'homme utilisait 100% d'énergie renouvelable. Cependant les moyens mis en jeu avec les énergies d'antan étaient-ils assez efficaces ? rapides ? Quelques exemples ci-dessous illustrent les développements des énergies fossiles dans quatre domaines : transport maritime, transport routier, agriculture, travaux publics...





Du transport aux chantiers en passant par l'agriculture : les énergies fossiles

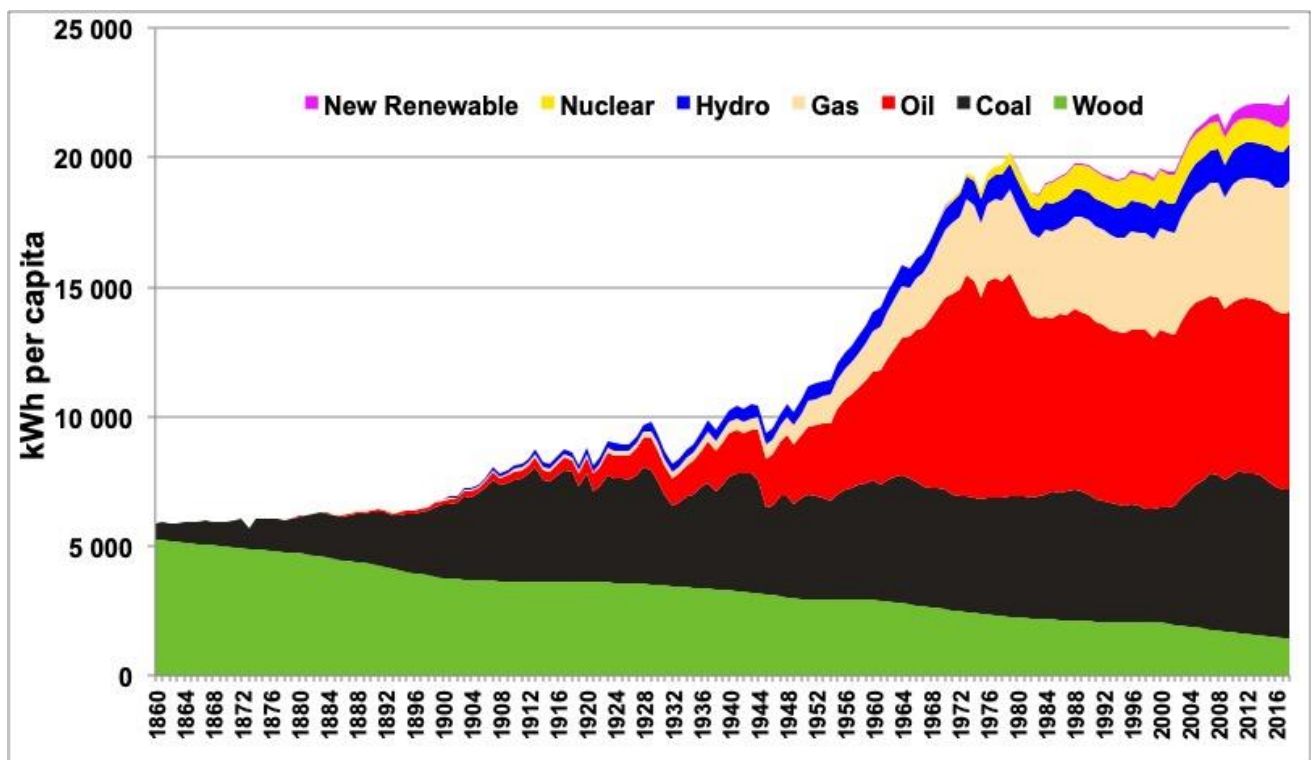
Les graphiques suivants présentent l'évolution des consommations mondiales et en France (par personne) de ressources en énergie ainsi que l'évolution des émissions de CO₂ en France.

On remarque que les énergies fossiles (NB : Gas, Oil et Coal, resp. Gaz, Pétrole et Charbon) sont en grande majorité utilisées encore ; la part des énergies renouvelables est infime au regard des autres.

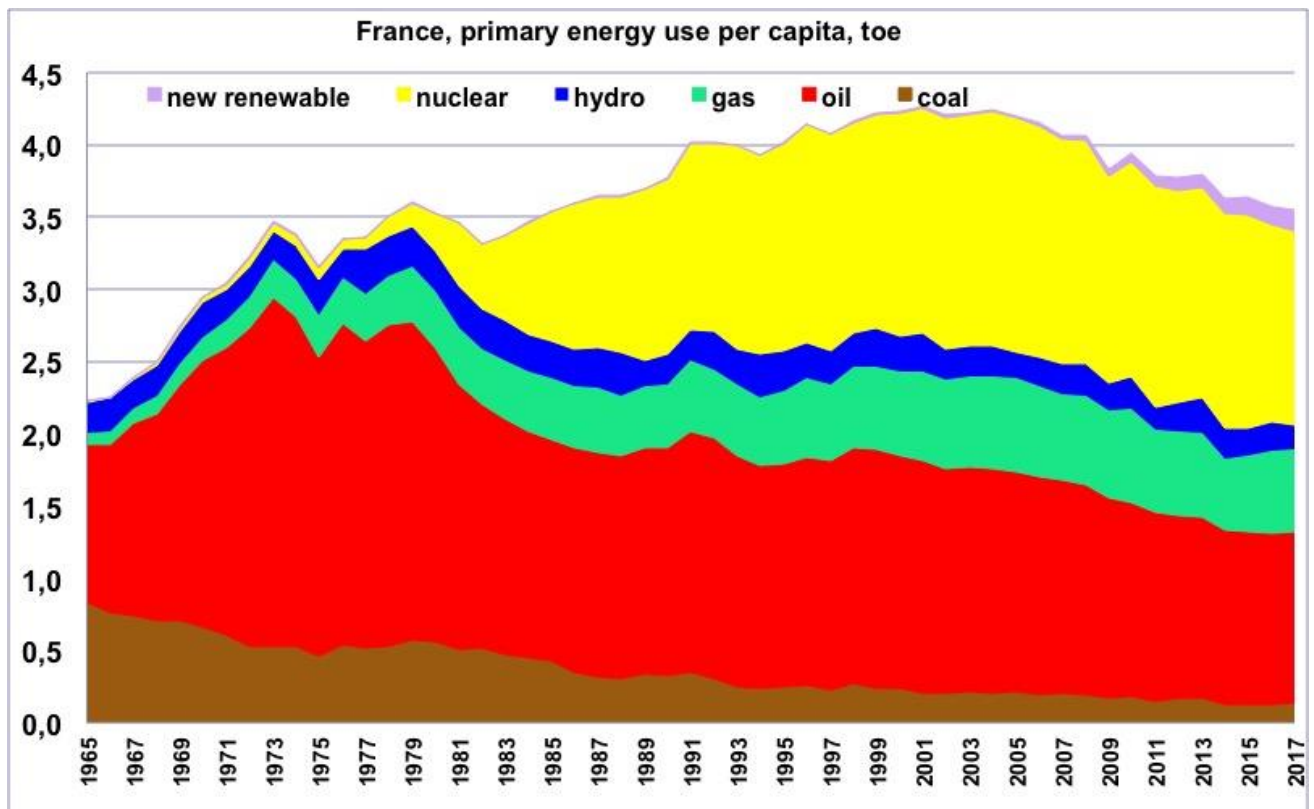
On peut ajouter les deux points suivants intéressants à prendre en considération :

- La moitié de l'énergie produite à partir de pétrole sert aux machines dédiées au transport de personnes et marchandises ;
- Près de deux tiers de l'énergie produite à partir de charbon sert à la production d'électricité dans des centrales électriques au charbon....

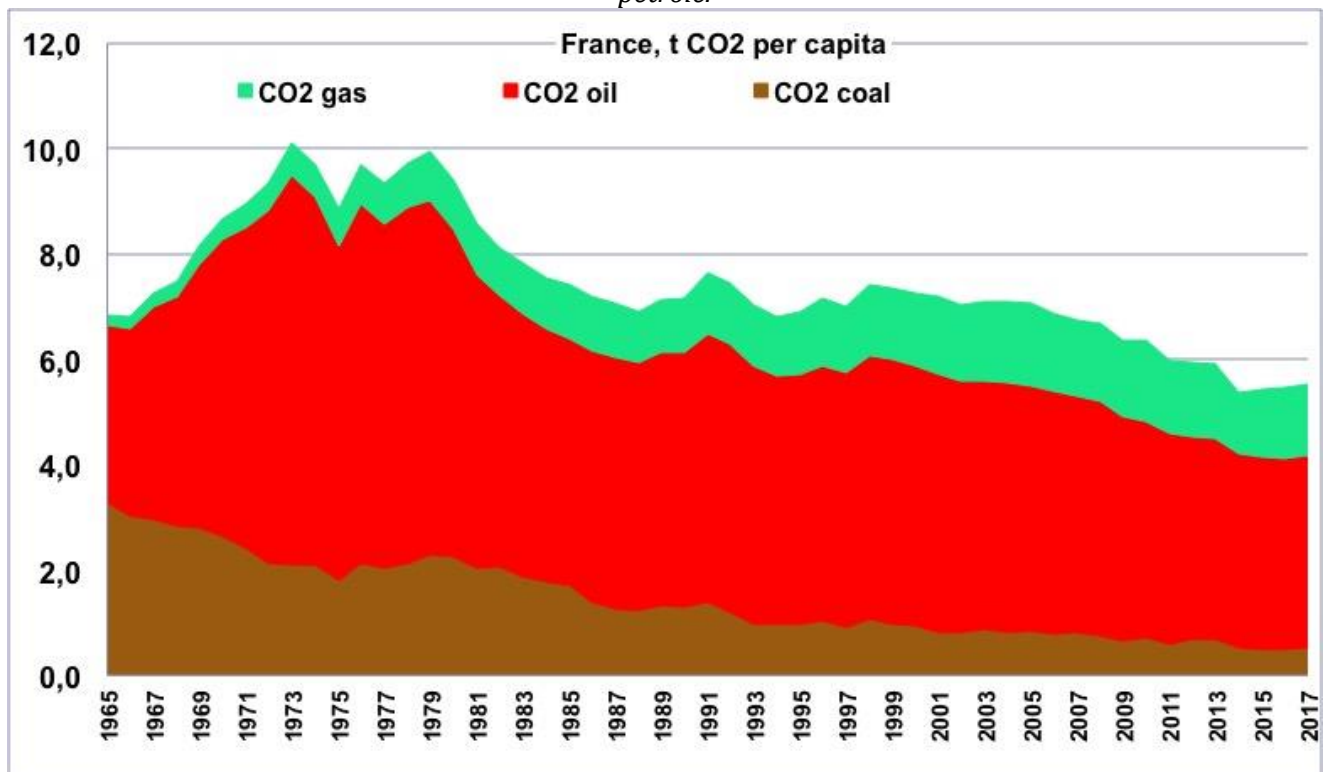
Enfin, en guise de comparaison : l'ensemble des machines sur Terre qui travaillent pour nous a la même force mécanique que si notre puissance musculaire était multipliée par 200...



Consommation d'énergie primaire par personne dans le monde, depuis 1860, en kWh.



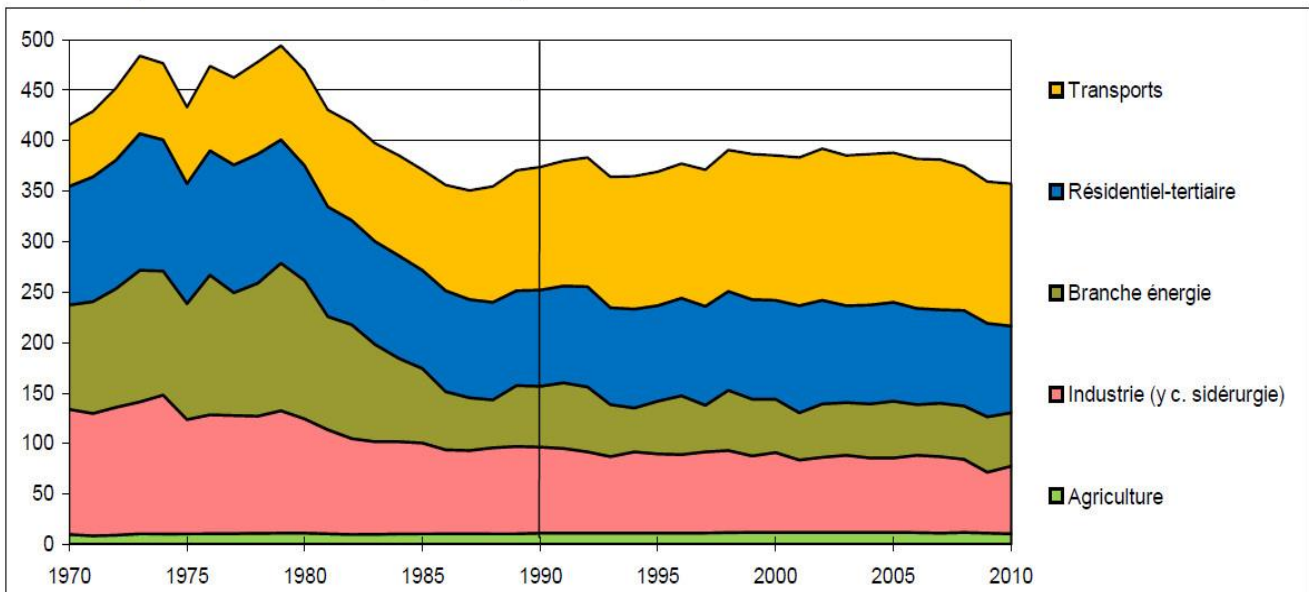
Consommation d'énergie primaire par personne en France, bois exclu, depuis 1965, en tonnes équivalent pétrole.



Evolution des émissions de CO₂ d'origine fossile par personne en France depuis 1965, discriminée par énergie, en tonnes.

Émissions de CO₂ par secteur

Données corrigées des variations climatiques, en Mt CO₂



Source : SOES, bilan de l'énergie 2010

Emissions CO₂ en France par grands secteurs

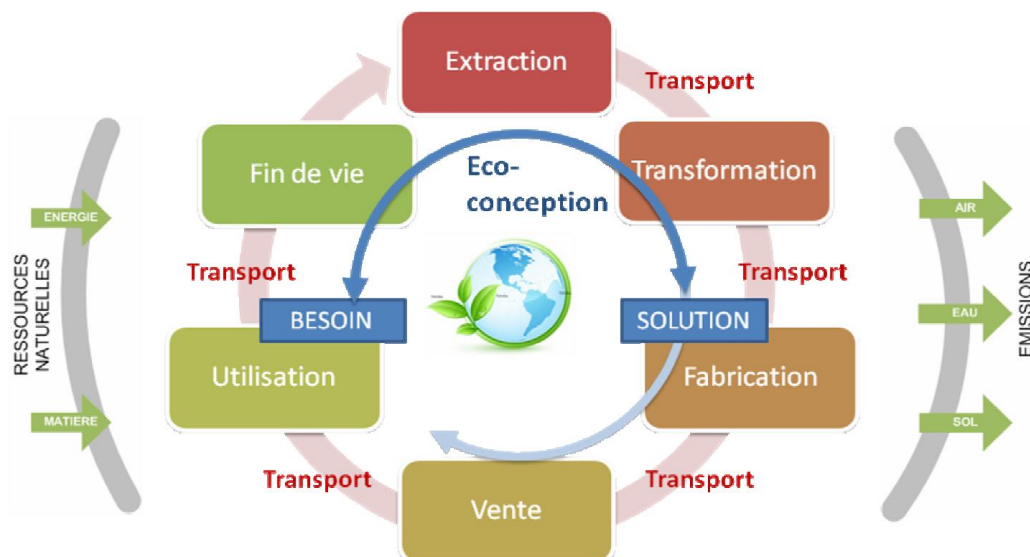
Ainsi afin de limiter les **impacts environnementaux** sur l'ensemble du **cycle de vie** des produits il est nécessaire d'**éco-concevoir**, c'est-à-dire d'intégrer l'environnement dans les phases de conception ou d'amélioration d'un produit aux côtés des critères « classiques » comme le coût.

2. Cycle de vie : étapes

2.1. Vue globale

Le cycle de vie commence à l'extraction des matières premières jusqu'à son élimination (fin de vie ou recyclage). Il est nécessaire de prendre en considération toutes les étapes afin d'éviter un déplacement des problèmes (impacts écologiques, conditions sociales...).

La démarche d'éco-conception ou d'écoconstruction s'inscrit totalement dans ce cycle.



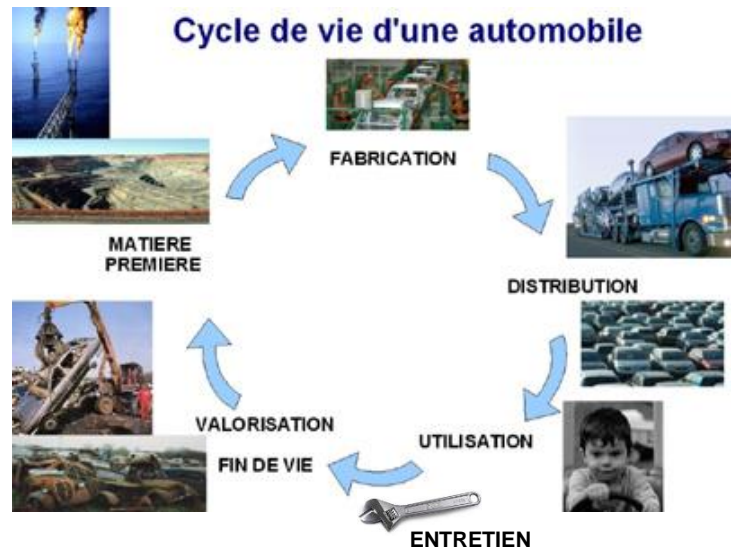
A chaque étape :

- Un produit consomme de l'énergie et des matières premières non renouvelables ;
- Un produit crée des impacts sur l'air, l'eau, le sol.

2.2. Exemple du cycle de vie d'une automobile

Typiquement, pour une automobile, on retrouve toutes les activités du cycle de vie d'un produit présentées auparavant et qui sont impliquées dans les phases de vie suivantes :

- Extraction des matières premières ;
- Production, fabrication ;
- Transport et distribution ;
- Utilisation ;
- Entretien ;
- Réutilisation ou recyclage ;
- Élimination finale.



2.3. La phase de fin de vie

Plusieurs scénarios possibles pour la fin de vie des produits :

- Recyclage
- Enfouissement
- Incinération
- Compostage

Le recyclage a évidemment un coût environnemental et énergétique mais celui-ci est généralement compensé par les impacts « évités » de la production de matière vierge.

A noter que :

- Pour les matériaux non-renouvelables (plastique, verre, métal) le recyclage présente moins d'impacts (GES et consommation énergétique) que l'enfouissement et l'incinération.
- Pour les matériaux renouvelables (papier, carton) le recyclage a :
 - Plus d'impacts que l'incinération si l'énergie produite par l'incinérateur remplace les carburants fossiles
 - Moins d'impacts que l'incinération si l'énergie produite par l'incinérateur remplace des biocarburants
 - Généralement moins d'impacts que l'enfouissement

3. Impacts et caractérisation pour l'éco-conception

Nous avons vu précédemment que chaque étape du cycle de vie d'un produit génère des impacts sur l'environnement, par l'extraction de matière première, de fabrication, d'assemblage, d'utilisation, etc. qui utilisent toutes de l'énergie et qui génèrent des impacts sur l'air, l'eau, le sol, la santé et apportent nuisances.

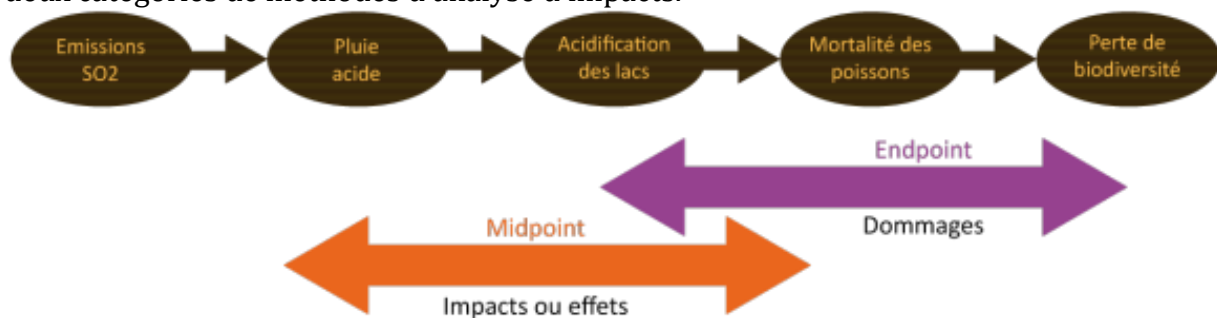
3.1. Méthodes d'analyse d'impact et catégories d'impact

Les méthodes d'analyse d'impact ont été introduites afin de relier les données d'un inventaire (exemple : substances) aux dommages environnementaux dont elles sont à l'origine.

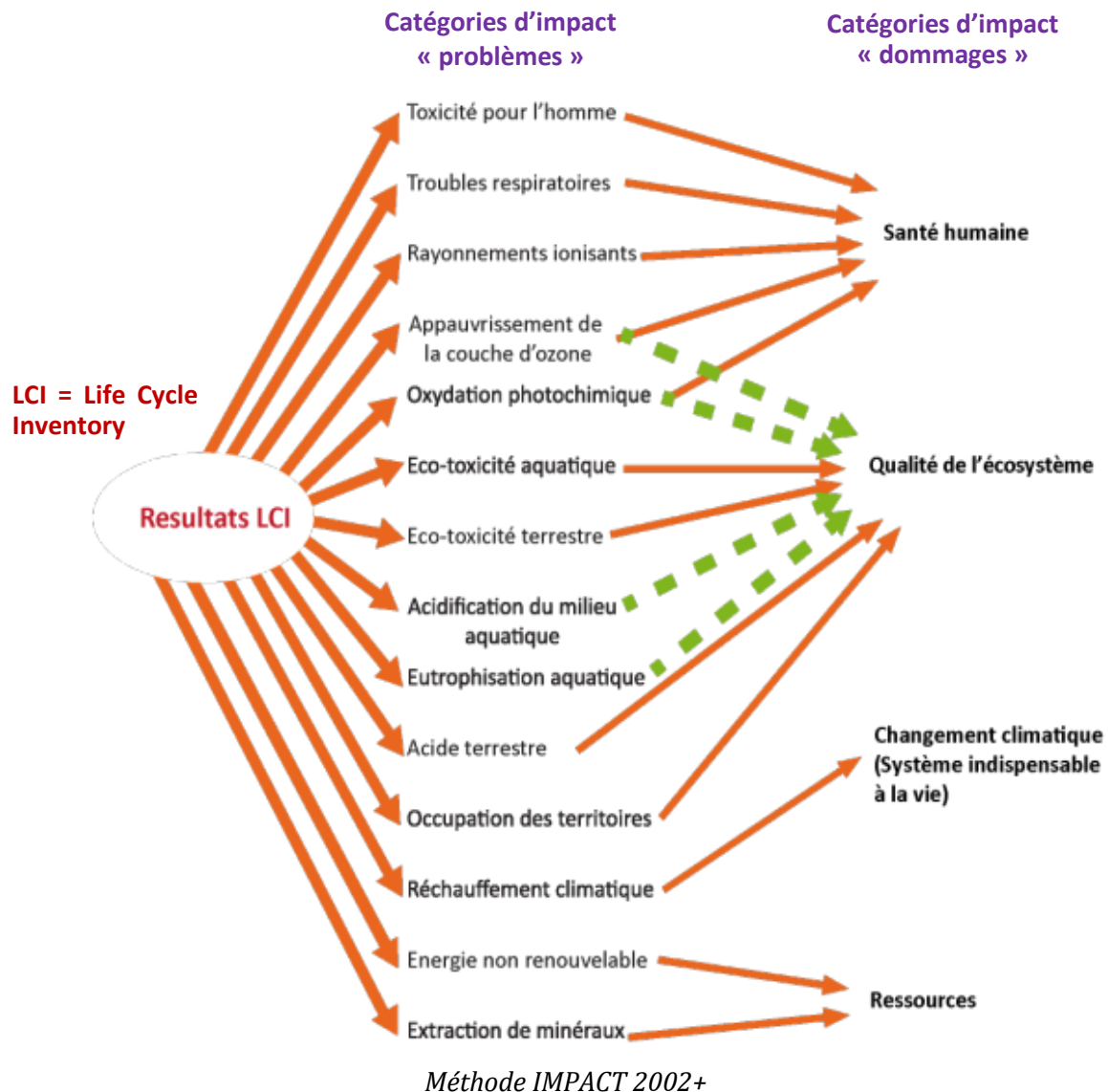
En pratique, on distingue deux catégories de méthodes de calcul des impacts potentiels en fonction de leur positionnement sur la chaîne des causes à effets : la méthode orientée **problèmes** et la méthode orientée **dommages**.

- Les méthodes orientées problèmes, dites « mid-point » (l'impact apparaît au milieu de la chaîne de causalité) qui quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées. Les résultats d'inventaire ayant des effets similaires sont regroupés dans des catégories d'impact appelées catégories intermédiaires, auxquelles on associe un indicateur intermédiaire (« mid-point » indicator) permettant de comparer les flux des substances contribuant à la catégorie en cause.
- Les méthodes orientées dommages, dites « end-point » (l'impact se trouve à la fin de la chaîne de causalité) qui estiment les dommages potentiels qui pourraient en résulter (cf. exemple illustré sur la figure suivante) en allouant plusieurs catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages. Celles-ci sont ensuite représentées par des indicateurs de dommages.

Sur l'exemple ci-dessous (émission de SO₂, dioxyde de soufre, dans l'atmosphère), on représente les deux catégories de méthodes d'analyse d'impacts.



Parmi les méthodes existantes et utilisées dans le cadre de l'éco-conception, on peut citer par exemple la méthode IMPACT 2002+ qui combine les deux types d'approches méthodologiques :



Dans la suite, nous allons classer les principaux types d'impacts environnementaux. Cette classification est issue de la méthode CML 2000, plutôt orientée dommages. Ils peuvent être classés en quatre familles d'impacts : Prélèvements, rejets (pollutions), nuisances et altération des écosystèmes.

On notera que chaque impact est quantifié par une **substance de référence**.

Familles d'impacts	Impacts	Substance [unité de référence]
Prélèvements	Epuisement des énergies non renouvelables	Energie [MJ]
	Epuisement des matières premières non renouvelables	Antimoine (Sb) [kg éq. Sb]
	Consommation de ressources naturelles non renouvelables	Antimoine (Sb) [kg éq. Sb]
	Artificialisation des sols	Surface d'utilisation des terres sur une année [m ² .an]
Rejets (Pollutions)	Gaz à Effet de Serre (GES) ou Global Warming Potential (GWP)	Dioxyde de carbone [kg éq. CO ₂]

	Acidification liée aux pluies acides	Dioxyde de soufre [kg éq. SO ₂]
	Eutrophisation : enrichissement excessif des milieux aquatiques en sels nutritifs	Composé phosphaté (PO ₄) [kg éq. PO ₄]
	Dégradation de la couche d'ozone	Chlorofluorocarbène [kg éq. CFC ₁₁] (Fréon 11)
	Ecotoxicité : excès d'émission dans air, eau, sols menaçant la viabilité des écosystèmes	Dichlorobenzène [kg éq. 1,4 DCB]
	Toxicité humaine : toxicité d'une substance directement sur l'être humain	Dichlorobenzène [kg éq. 1,4 DCB]
Nuisances	Acoustiques : bruit	
	Visuelles : aspect visuel	
	Olfactives : odeur	
	Vibrations	
Altération des écosystèmes	Désertification	
	Déforestation	
	Perte de biodiversité	

3.2. Caractérisation des impacts ou calcul du score d'impact

On rapporte l'impact considéré à une substance de référence, en effectuant une pondération :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s$$

Où :

SI_i : Score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie d'impact i (exemples : réchauffement climatique, eutrophisation, etc.) ;

$FI_{s,i}$: Facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s pour une catégorie d'impact intermédiaire donnée i ;

M_s : Masse émise ou extraite de la substance s (résultat de l'inventaire des émissions et extractions).

L'équation précédente, est une caractérisation intermédiaire (calcul du score d'impact intermédiaire). Or, la caractérisation des dommages permet de rassembler les impacts intermédiaires en grandes catégories de dommages, mais en considérant que chaque catégorie d'impact intermédiaire possède une responsabilité plus ou moins importante dans la contribution au dommage que l'on évalue. Ainsi, pour passer de la caractérisation intermédiaire à une évaluation des dommages, et obtenir un score de caractérisation des dommages, il convient de multiplier le score d'impact intermédiaire de la substance considérée par son facteur de caractérisation des dommages :

$$SD_d = \sum_s FD_{i,d} \cdot M_s$$

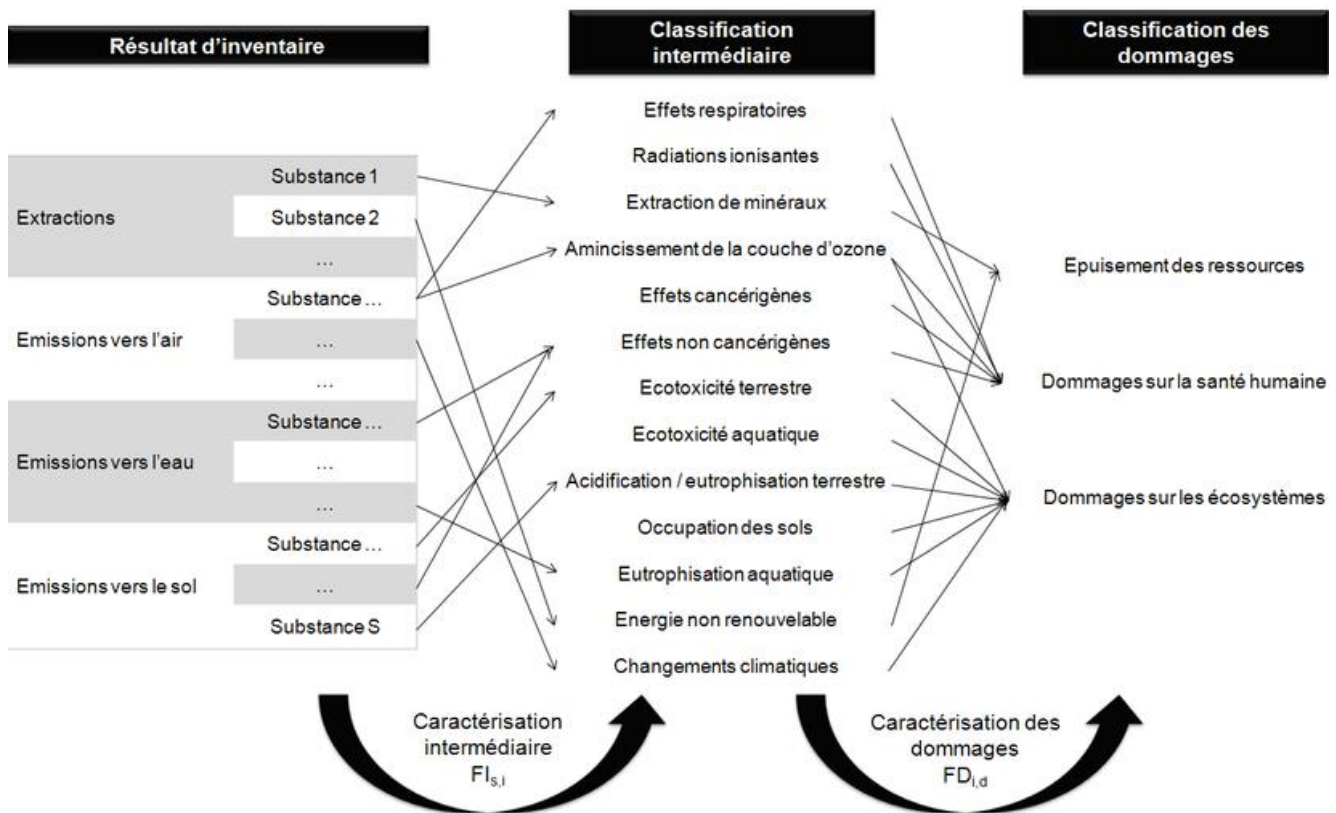
Où :

SD_d : Score de caractérisation du dommage pour la catégorie de dommage d (exemples : Santé humaine, changements climatiques, etc.) ;

$FD_{i,d}$: Facteur de caractérisation d'un dommage donné d pour la catégorie intermédiaire i ;

SI_i : Score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie d'impact i (exemples : réchauffement climatique, eutrophisation, etc.).

Dans la méthode IMPACT 2002+, cela conduit à la démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les grandes catégories de dommages environnementaux :



Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les grandes catégories de dommages environnementaux (d'après Jolliet et al., 2010)

3.3. Exemple des gaz à effet de serre

Le potentiel de réchauffement climatique (PRG) ou Global Warming Potential (GWP) est utilisé pour calculer le facteur de caractérisation de l'effet de serre. Le GWP d'une substance est défini comme étant l'intégration, sur un laps de temps donné, du « forçage radiatif » (i.e. augmentation ou diminution de l'échange d'énergie par rayonnement) généré par un kg de ce gaz, injecté instantanément dans l'atmosphère.

Le GWP est rapporté au CO_2 et il se calcule pour chaque gaz à effet de serre k de la manière suivante :

$$GWP_k = \frac{\int_0^T a_k c_k(t) dt}{\int_0^T a_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2}(t) dt}$$

Où :

GWP_k : potentiel de réchauffement climatique pour le gaz k ;

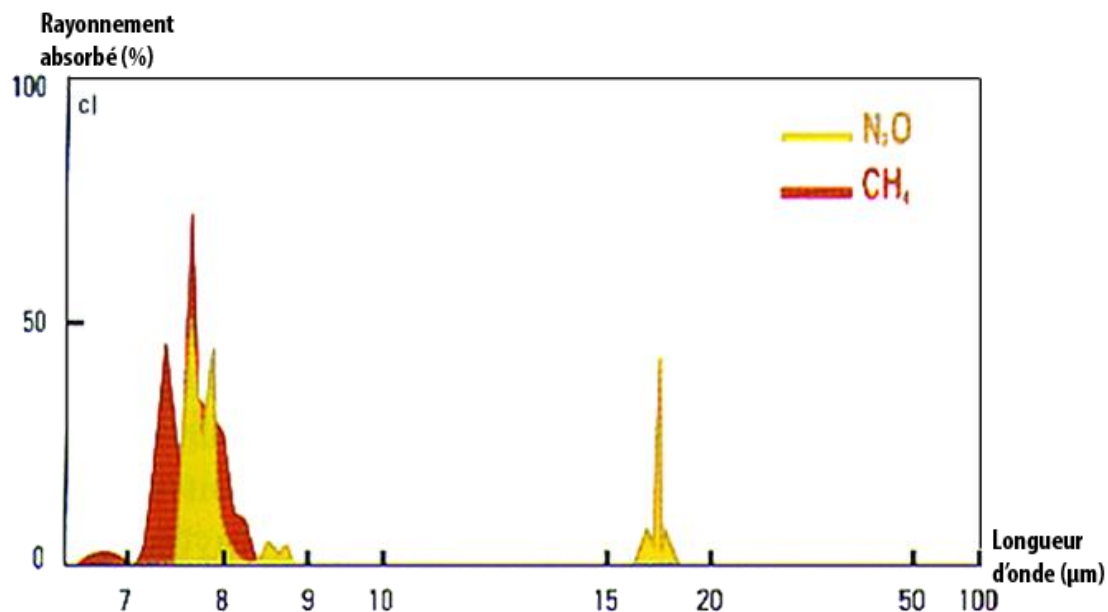
a_k : absorption de la radiation thermique suite à une augmentation de la concentration du gaz k ;

$c_k(t)$: concentration du gaz k restant au temps t après son émission ;

a_{CO_2} : absorption de la radiation thermique suite à une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone ;

$c_{CO_2}(t)$: concentration de dioxyde de carbone restant au temps t après son émission ;

Les graphes ci-dessous illustrent et comparent l'absorption de la radiation thermique pour deux gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère ; à savoir protoxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4) qui sont de puissants gaz à effet de serre.



Pourcentage du rayonnement absorbé (en ordonnée) selon la longueur d'onde en micromètres (en abscisse) pour le méthane et le protoxyde d'azote dans l'atmosphère.

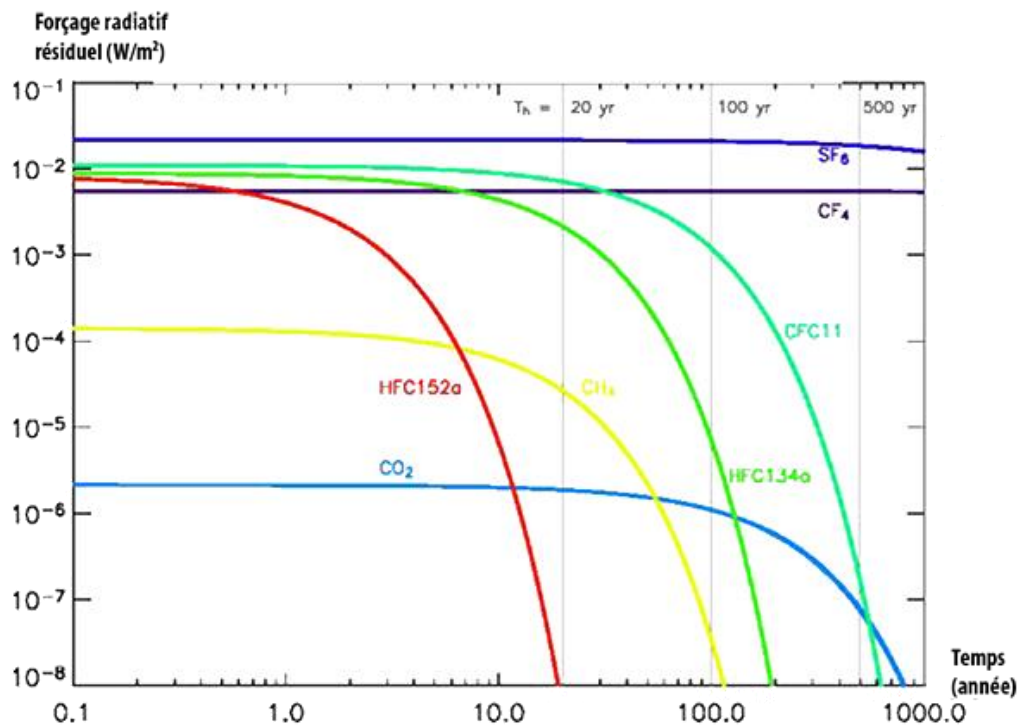
L'intensification de l'effet est évaluée suivant l'équation :

$$\text{Effet de serre [kg éq. CO}_2\text{]} = \sum_k (GWP_k \times \text{masse de la substance } k \text{ émise [kg]})$$

Le GWP est dépendant de la durée de l'échelle de temps choisie. Pour les effets à long terme, l'échelle 100 à 500 ans est souhaitable quand il s'agit d'effets cumulatifs, alors que les échelles, allant de 20 à 50 ans, donnent une meilleure indication sur les effets à court terme des émissions.

Ci-dessous, les courbes montrent que les gaz à effet de serre peuvent mettre de quelques dizaines à plusieurs, voire plusieurs milliers d'année à disparaître de l'atmosphère. Il n'est pas simple de savoir avec précision combien de temps sera nécessaire pour évacuer ce que nous émettons aujourd'hui, car l'atmosphère est un système très complexe, faisant intervenir tout un ensemble de phénomènes (physiques, chimiques, biologiques...), dont les scientifiques n'ont pas encore percé tous les mystères...

On voit qu'il faut attendre de l'ordre du siècle avant que le CO_2 ne commence à être évacué de l'atmosphère de manière significative, de l'ordre de 10 ans pour le méthane, mais que certains halocarbures (par exemple le CF_4 , en haut du diagramme) n'ont toujours pas commencé à s'épurer significativement de l'atmosphère au bout de 1.000 ans.



Forçage radiatif résiduel, au cours du temps, et en watts par mètre carré, provenant d'un million de tonnes de gaz émises à l'instant 0.

Ce qu'illustre le graphique précédent est une notion de « vitesse d'élimination », qui peut servir à définir une durée de séjour approximative, c'est à dire le temps qui est nécessaire à ce que le gaz en surplus commence à s'évacuer de l'atmosphère. Bien entendu cette durée de séjour (ou de résidence) n'est valide que pour autant que les conditions restent « égales par ailleurs ».

En général, dans les ACV on utilise 100 ans pour la durée de base et qui servira de comparaison entre les différents gaz à effet de serre. En guise d'exemple, voici les GWP (ou PRG) relatifs de 6 gaz ou familles de gaz (les Perfluorocarbures et Hydrofluorocarbures sont des halocarbures particuliers)

Gaz	Formule	GWP relatif / CO ₂ (à 100 ans)
Gaz carbonique	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	28
Protoxyde d'azote	N ₂ O	265
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	7400 à 12200
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	120 à 14800
Hexafluorure de soufre	SF ₆	22800

Valeurs conventionnelles de gaz à effet de serre en « équivalent CO₂ » (©Connaissance des Énergies, d'après 5e rapport du GIEC)

En conclusion de cette partie, on peut citer quelques exemples de production de matière, mais aussi d'énergie.

Matériau	Émissions équivalentes de CO ₂ en kg par tonne produite
Verre bouteille	120
Ciment	250
Acier	300 à 850 selon le pourcentage de ferrailles
Verre plat	400
Papier-carton	300 à 500
Plastiques ¹ (PE, PS, PCV, PET, ABS...)	500 à 1600
Aluminium	600 à 3000 selon le pourcentage de déchets d'aluminium

Exemples d'émissions éq. CO₂ pour la production de matériaux

Énergie	Émissions équivalentes de CO ₂ en g/kWh électrique
Éolienne	3 à 22
Hydraulique	4
Nucléaire	6
Photovoltaïque	60 à 150
Cycle combiné à gaz	430
Charbon	800 à 1050 suivant la technologie
Biomasse bois	1500 sans replantation

Exemples d'émissions éq. CO₂ pour la production d'énergies

3.4. Bilan

En conclusion, l'**Analyse du Cycle de Vie** réalise un **bilan détaillé et quantitatif** des entrées et des sorties mesurées aux frontières d'un produit. Cette analyse peut prendre en compte différents critères ou impact et les différentes étapes du cycle de vie mais afin de prendre en compte la notion de transfert d'impact, l'**analyse multicritère / multi-étape** est la plus pertinente.

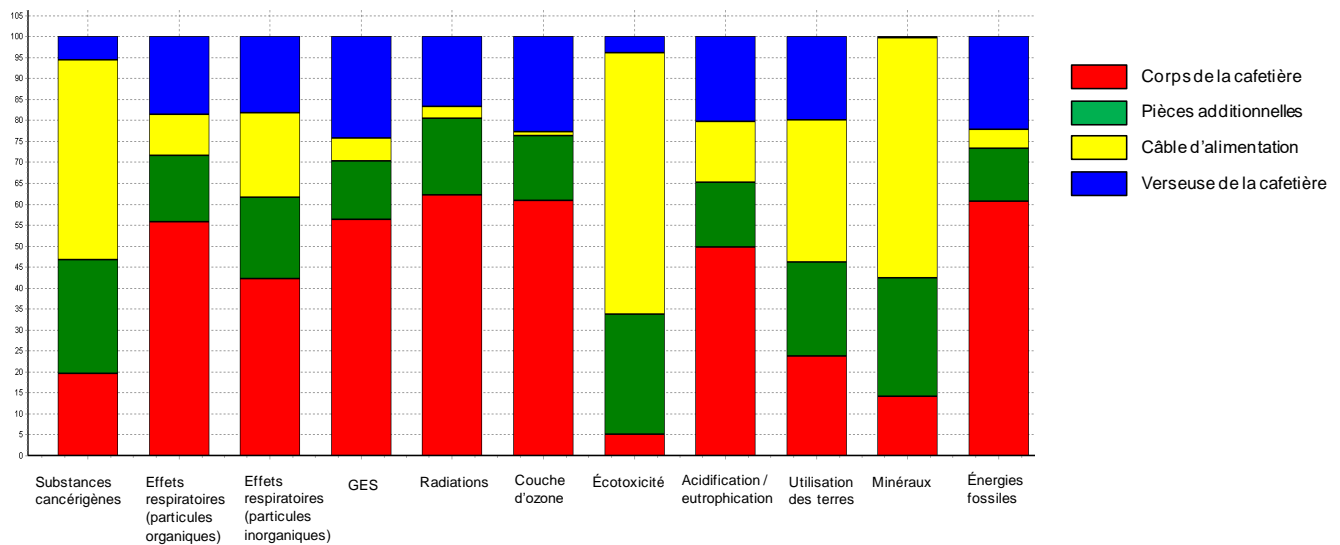
Ainsi, pour chacune des étapes du cycle de vie d'un produit, il faut recenser les flux de matières et d'énergie. Les impacts environnementaux sont ensuite quantifiés sur l'ensemble du cycle de vie.

Enfin, et nous le verrons dans le cas d'étude suivant ; une étape de normalisation est, quelle que soit la méthode utilisée (méthodes orientées dommages ou méthodes orientées problèmes) préférables pour faciliter l'interprétation. Ainsi, l'unité d'un facteur intermédiaire ou dommage normalisé est le nombre équivalent de personnes affectées pendant une année par unité d'émission de la substance de référence considérée.

¹ PE : Polyéthylène ; PS : Polystyrène ; PVC : Polychlorure de vinyle ; PET : Polytéraphthalate d'éthylène ; ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène

4. Cas d'étude : Analyse du Cycle de Vie d'une cafetière

Nous traiterons l'exemple d'une cafetière.



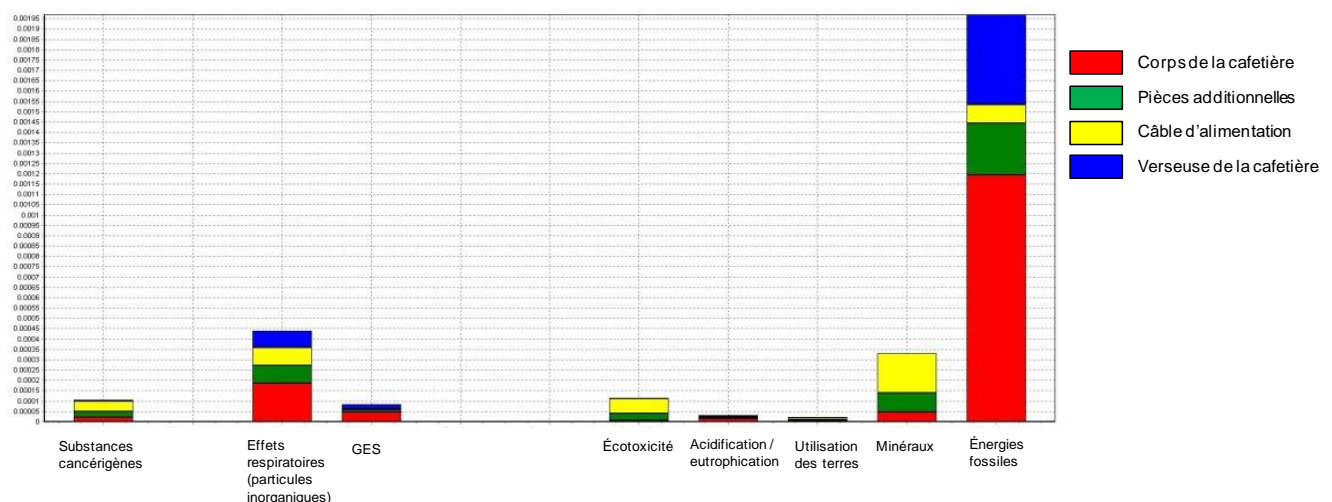
Impacts environnementaux dans le cas d'une cafetière

Toutes les catégories d'impacts sont à 100 % car ils n'ont pas la même unité.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, il convient d'analyser l'importance des impacts en termes de contribution par rapport aux contributions globales. Par exemple, les émissions qui contribuent à l'acidification dans l'ACV sont-elles significatives par rapport aux émissions globales qui contribuent à l'acidification ?

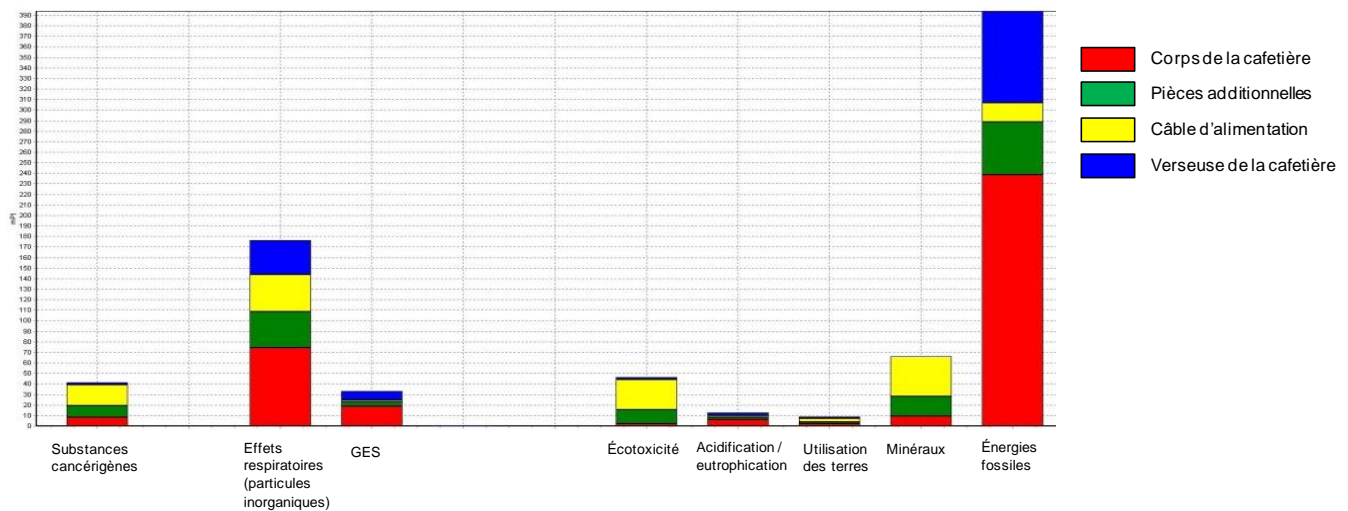
C'est la phase de **normalisation** : les différentes familles d'impacts sont comparées avec les effets environnementaux causés par un européen moyen sur une année.

Les facteurs de normalisation représentent les émissions / consommations globales pendant un an sur une zone géographique donnée. Les résultats sont divisés par ce facteur, ce qui permet d'avoir une quantification de l'importance de l'émission par rapport aux émissions totales.



Etape de normalisation

L'étape suivante est la **pondération** qui consiste à donner plus de poids aux impacts qui sont jugés plus « graves » : l'effet de serre est-il plus néfaste que l'épuisement des ressources ? Elle est de ce fait controversée car il s'agit de pondérer puis d'additionner des impacts de natures différentes, nécessitant des partis-pris importants parfois considérés comme arbitraires.

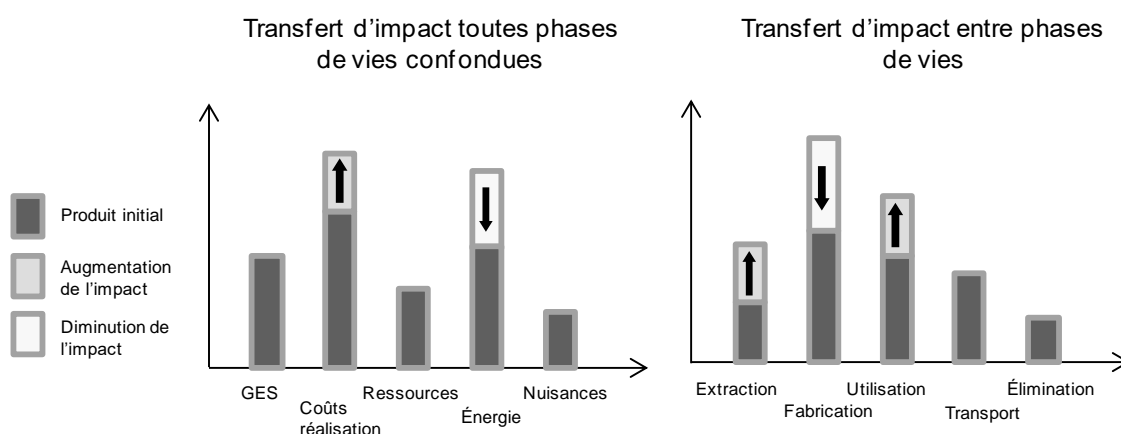


Etape de pondération

5. Notion de transfert d'impact pour l'éco-conception

La société Bic communique sur la réduction de l'émission de CO₂ de son nouveau produit, mais qu'en est-il de l'augmentation de l'acidification et de l'écotoxicité ?

Ainsi, lors de l'évolution d'un produit dans le cadre d'une écoconception, il s'agit d'éviter ou d'arbitrer, les **transferts d'impact** correspondant à un déplacement d'un impact à l'autre ou d'une phase de vie à l'autre.



Transferts d'impact dans le cadre de l'évolution d'un produit

Sur la figure précédente, l'évolution du produit a engendré un transfert d'impact de la consommation d'énergie au coût de réalisation.

L'évolution de ce produit a également engendré un transfert d'impact de la fabrication vers l'extraction et l'utilisation.