

DESCRIPTION ET MODELISATION DES SYSTEMES

EN SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGENIEUR (SII),
INTRODUCTION A L'INGENIERIE SYSTEME

Selon la Commission des Titres d'Ingénieurs (CTI), voici la définition d'un ingénieur : *"Le métier de l'ingénieur consiste à poser, étudier et résoudre de manière performante et innovante des problèmes souvent complexes de création, de conception, de réalisation, de mise en œuvre et de contrôle, ayant pour objet des produits, des systèmes ou des services - et éventuellement leur financement et leur commercialisation - au sein d'une organisation compétitive. Il prend en compte les préoccupations de protection de l'homme, de la vie et de l'environnement et plus généralement du bien-être collectif."*

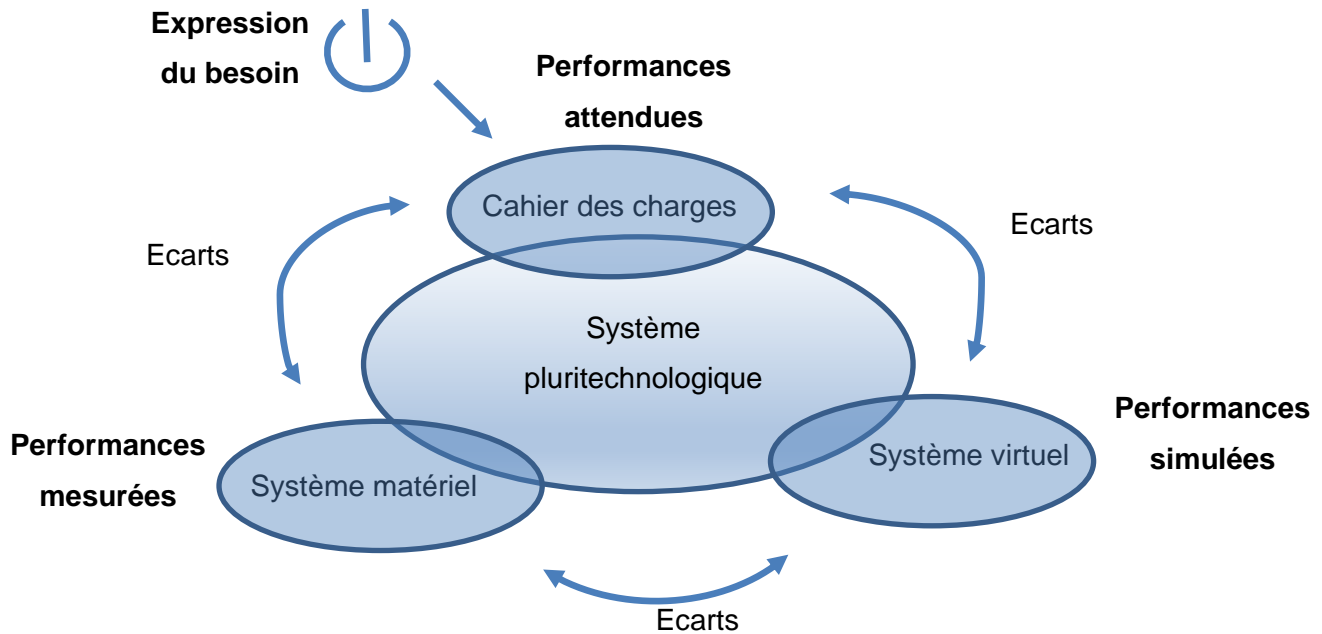
Les fonctions sont exercées dans des champs divers :

- agriculture, agronomie, agroalimentaire
- chimie, génie des procédés
- génie biologique, génie médical
- sciences de la terre
- matériaux
- génie civil, bâtiment, aménagement, environnement
- mécanique, énergétique
- électricité, électrotechnique, automatique
- électronique, télécoms et réseaux
- informatique, systèmes d'information, mathématiques, modélisation
- génie industriel, production, logistique

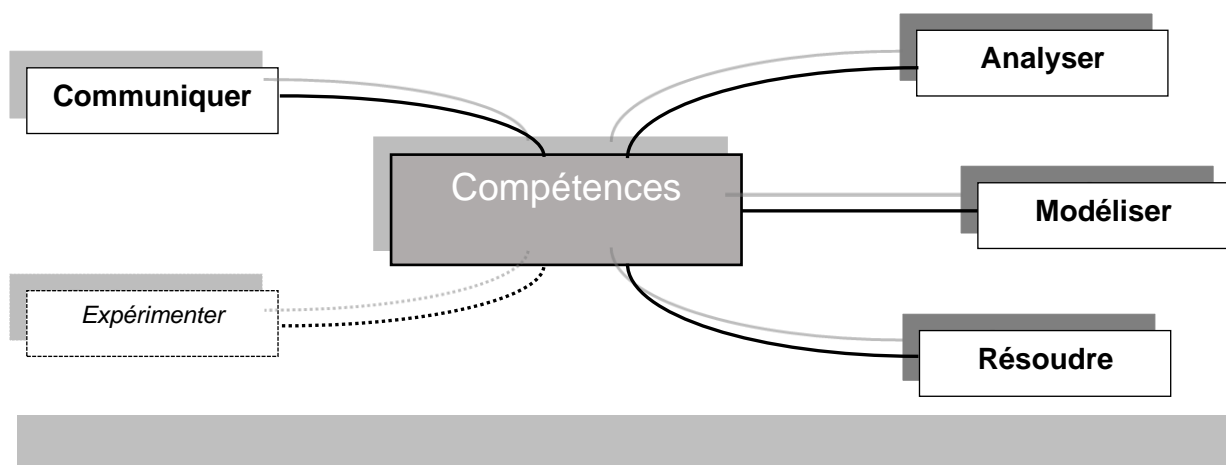
L'objectif du cours de SII en CPGE est de développer des compétences, capacités et connaissances permettant d'évaluer des écarts chiffrés entre des performances clairement définies pour un système pluritechnologique, en vue de concevoir, d'améliorer ou d'innover dans les nombreux domaines où les STEM sont présents de nos jours.

STEM : Sciences, Technology, Engineering and Mathematics.

Un système sera étudié dans sa globalité à partir des 3 approches imbriquées suivantes :



On peut classer les compétences nécessaires pour cela :



1 QU'EST-CE QU'UN SYSTEME ?

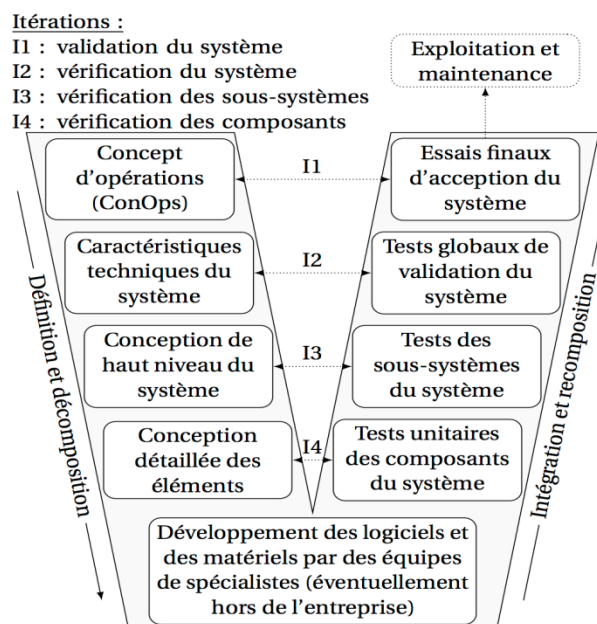
1.1 Définition

Les systèmes existent dans des domaines très variés (biologie, économie, management des organisations, etc). Dans le cadre de la formation scientifique, les systèmes techniques seront particulièrement étudiés, mais les méthodes de raisonnement peuvent être transposées à tout système : en effet, les produits modernes nécessitant une ingénierie avancée sont bien souvent des systèmes complexes voire des systèmes de systèmes.

D'après L'AFIS (Association Française pour l'Ingénierie Système) :

Un système est décrit comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement, intégrés pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité. Un système présente donc des propriétés nouvelles résultant des interactions entre ses constituants et est donc bien plus qu'un ensemble de composants : les flux d'information, d'énergie ou de matière échangés entre les composants sont essentiels dans le comportement global.

Le comportement global d'un système ne se déduit pas directement du comportement de chacun de ces composants ou sous-systèmes. Lors de la conception d'un système complexe, l'équipe de travail de l'entreprise concernée tend à utiliser une démarche d'analyse descendante pour la définition des solutions techniques à adopter puis une démarche d'analyse ascendante pour l'intégration et la validation de ces solutions conformément au schéma suivant :



Processus de conception « en V » (source IBM)

1.2 Le Cahier de Charges Fonctionnel (CdCF)

La vente d'un produit et en particulier d'un système complexe par une entreprise nécessite que celle-ci corresponde à des attentes du demandeur clairement identifiées.

L'étude des systèmes en SII est toujours liée à une **fonction** du système, dite **de service**, clairement énoncée, et dont les critères d'appréciations ainsi que leurs niveaux chiffrés sont précisés.

Une fonction de service est énoncée en termes de services rendus indépendamment des solutions techniques retenues dans la conception du système.

La norme NF X 50-151 propose un guide pour la rédaction d'un Cahier des Charges Fonctionnel dans lequel la forme de présentation des fonctions de service est reprise dans l'enseignement des SII.

Ainsi un système fera l'objet d'une :

Présentation générale du système.

Cette partie très importante est destinée à donner toutes les informations générales utiles concernant le produit : marché, contexte du projet, objectifs, énoncé du besoin, environnement du produit, etc...

Domaine d'application : industrie manufacturière, textile, aéronautique, navale, automobile, agricole, jeu vidéo, etc... industrie de production et de distribution de l'énergie, industrie d'extraction des matières premières, industrie du recyclage.

Expression fonctionnelle des besoins.

Cette partie fondamentale décrit et définit les différentes fonctions de service du produit ainsi que les contraintes et les **critères** d'appréciation qui y sont associés. Il doit aussi apparaître, associées à ces critères, des spécifications permettant de fixer le **niveau** d'exigence requis, correspondant le plus souvent à une grandeur mesurable. Dans la mesure du possible, il est conseillé d'ajouter une indication de la flexibilité pour les niveaux d'exigence, soit sous une forme symbolique à niveaux (0 : impératif ; 1 : peu négociable, 2 : négociable, 3 : très négociable), soit sous une forme numérique ou explicite, avec des limites : les flexibilités permettent à l'ingénieur de créer un système moins contraint, donc moins cher.

Les informations sont le plus souvent réunies sous la forme d'un tableau tel que celui ci-après :

Fonctions ou Exigences	Critères	Niveaux	Flexibilités
	Grandeur physique mesurable	Valeurs limites de la grandeur	Indication chiffrée ou non

La notion de flexibilité, très importante dans la phase de conception d'un produit, est liée à un contexte économique donné. Il ne fait pas l'objet d'études dans le cadre du programme de PCSI-MPSI.

Exemple : Hemomixer HX 006 de la société Hemopharm



Le HX 006 est un dispositif d'assistance automatisé pour les collectes de sang. Le HX 006 est équipé en série du système de pesée mécanique et d'agitation simultanée.

Fonctions ou exigences	Critères	Niveaux	Flexibilités
Programmer le volume de sang à prélever	Etendue	De 10 à 550ml	0
	Résolution	Par pas de 10ml	0
Peser le sang prélevé	Etendue du pesage	0 à 1100ml	0
	Précision du pesage	± 2 ml	1
Agiter la poche de sang prélevé	Volume mini	5ml	1
	Vitesse d'agitation	10 cycles/min	1

On remarque qu'aucune solution technique n'est évoquée à ce niveau de description purement fonctionnelle du système.

2 L'ANALYSE DES SYSTEMES

2.1 Démarche d'analyse des systèmes

Les Sciences Industrielles de l'Ingénieur consistent à modéliser tout ou partie du système en vue de l'analyse de ses performances. Modéliser un système, quel que soit le type de modélisation, consiste à :

- **Isoler le système à étudier** : Pour cela, il faut identifier une frontière et remplacer son environnement extérieur par un ensemble de relations d'entrées-sorties ayant des relations équivalentes.
- **Le décomposer en sous-systèmes couplés par des relations** : Les frontières de découpage passent en général par les points de rupture des caractéristiques que l'on observe (structures matérielles discontinues dans l'espace, dans le temps, au niveau des fonctionnalités...). La finesse du découpage dépend de l'utilité du modèle.
- **Etablir un modèle de connaissance ou de comportement pour chaque sous-système** :

Le **modèle de connaissance** est obtenu en spécifiant les lois (équations différentielles ou autre) qui régissent les phénomènes physiques connus mis en jeu dans les différents composants du système.

Le **modèle de comportement** est celui dit « de la boîte noire ». Le système est représenté par des structures et des équations qui reproduisent son comportement réel. Les paramètres de ce modèle ne peuvent être déterminés que par une procédure d'identification qui servira aussi à valider le modèle parfois posé a priori.

2.2 Les langages pour la modélisation

Les langages pour la description d'un système et des modèles associés pour sa conception, sa reconception ou son analyse sont multiples et correspondent à des besoins différents.

La langue naturelle (Français, Anglais, ...) permet de s'adresser aux clients, au service de vente, ...

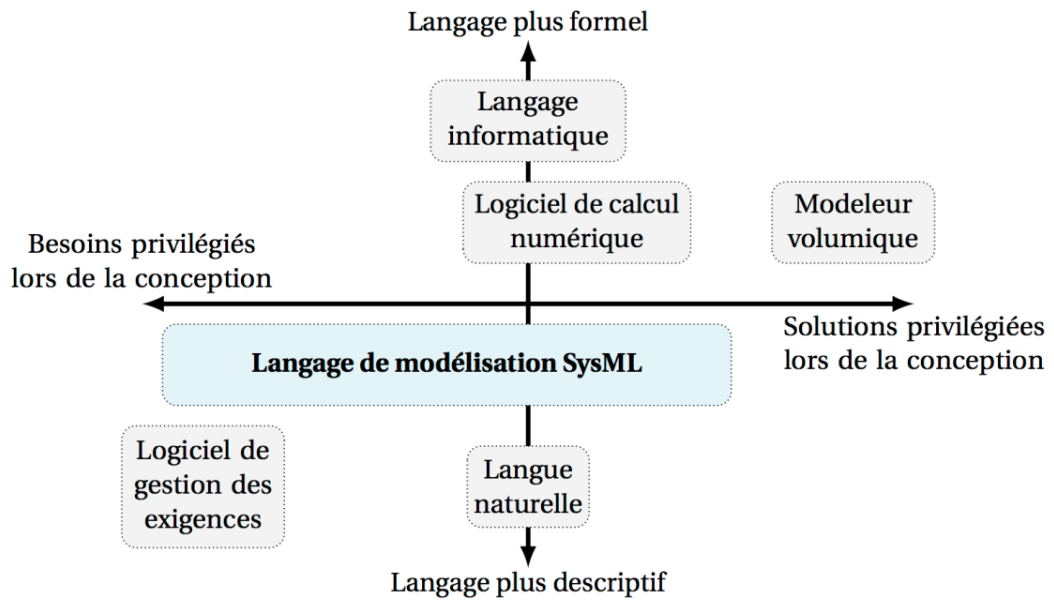
Les logiciels et langages de description des exigences permettent de spécifier le système pour le marketing, la recherche et le développement, la vente, ...

Les langages de spécifications structurelles, comportementales du système tels que le **SysML** qui s'adresse plus spécifiquement à la recherche et au développement des solutions techniques.

Les logiciels de dessin appelés modeleurs volumiques tels que **SolidWorks**, **OnShape** (version online gratuite) ou **Catia** et leurs logiciels associés de calcul des mouvements des efforts, déformations, vibrations, températures, processus de fabrication, ...

Les logiciels de calcul numérique **Matlab** ou **Scilab** avec les boîtes à outils « métiers » utiles.

Les langages informatiques pour la modélisation ou le pilotage des systèmes tels que **C**, **Python** ou **Java**.



Positionnement du langage SysML d'après document Valeo

3 LE LANGAGE SYMML

Le langage SysML (Systems Modeling Language) a pour but de présenter graphiquement de manière hiérarchisé les nombreuses spécifications d'un système technique complexe.

Les différents diagrammes du langage SysML sont proposés à la lecture en CPGE. La maîtrise de l'écriture des diagrammes n'est donc pas attendue pour les concours.

Le langage SysML propose des :

Diagramme d'exigences (Requirement Diagram) : décrit ce que doit réaliser le système ainsi que les contraintes auxquelles il doit se soumettre.

Diagrammes comportementaux :

- *Diagramme des cas d'utilisation (Use Case Diagram) : décrit les objectifs de l'utilisateur à travers le système.*
- Diagramme d'états
- Diagramme de séquences
- Diagrammes d'activités

Diagrammes structurels :

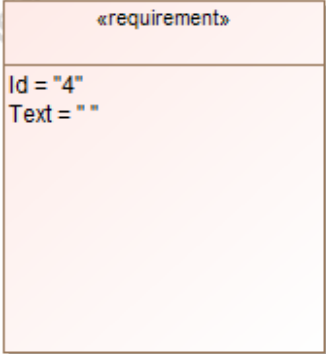

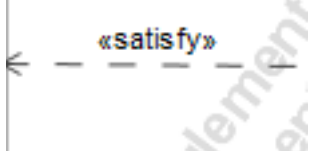
- *Diagramme de définition de blocs (Block Definition Diagram) : décrit l'architecture matérielle, logicielle du système ou de son contexte (environnement matériel et humain du système)*
- *Diagramme de blocs internes (Internal Block Diagram) : décrit l'organisation interne du système ou d'un élément du système et les flux d'informations, matières ou énergies entre ses composants.*
- Diagramme de paquetages
- Diagramme paramétrique

3.1 Diagramme d'exigences « requirements »

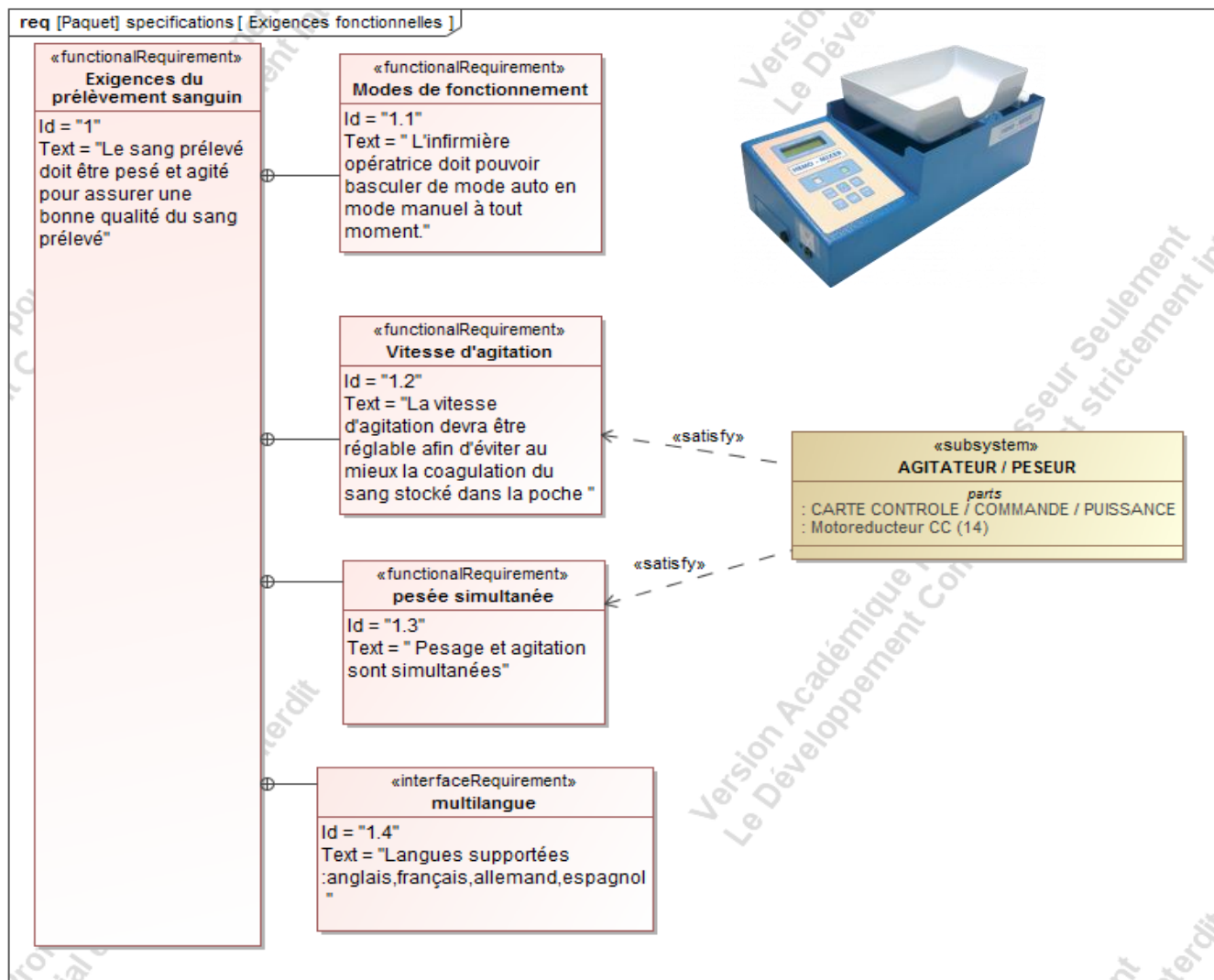
Ce diagramme permet de présenter les exigences devant être vérifiées par le système exprimées dans le Cahier des Charges et éventuellement les solutions mises en œuvre. Il traduit par des fonctionnalités ou des contraintes ce qui doit être satisfait par le système qui peuvent être d'ordre fonctionnel, technologique, économique, environnementale, réglementaire.

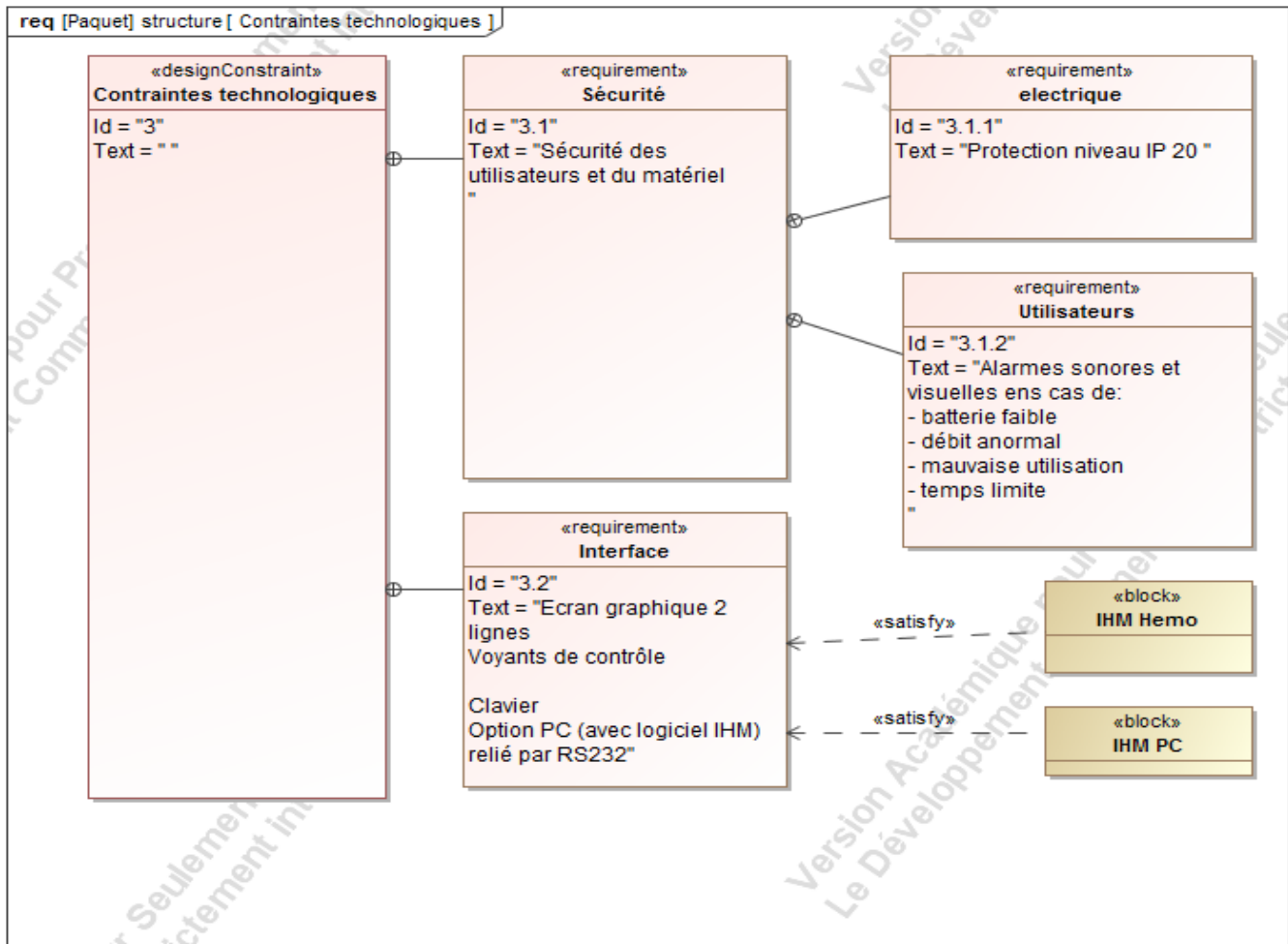
Pour être lisible ce diagramme ne permet pas de présenter toutes les exigences associées au CdCF sur un seul et unique diagramme. Il est possible de présenter les exigences par type : technique, économique, ...

Elements graphiques :

Bloc d'exigence : « requirement » Dénomination, identificateur et texte de présentation de l'exigence	Lien de raffinement : « Refine » Lien de précision d'une exigence « côté rond » en une autre exigence « côté trait »	Lien de satisfaction : « satisfy » Lien présentant la solution technique associée à l'exigence côté flèche
		

Exemple : Hemomixer HX006



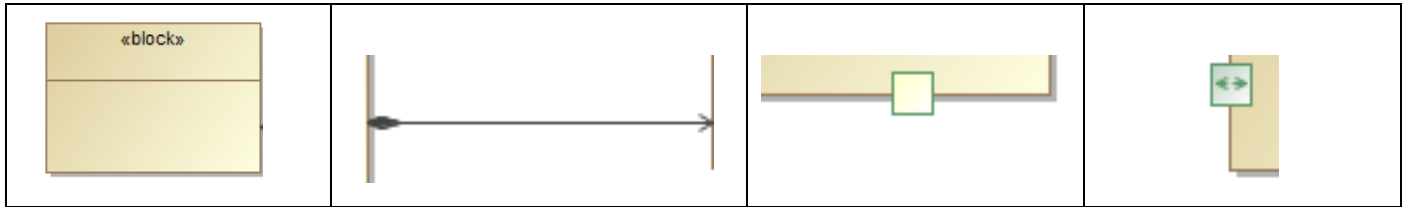


3.2 Diagramme de définition de blocs « bdd »

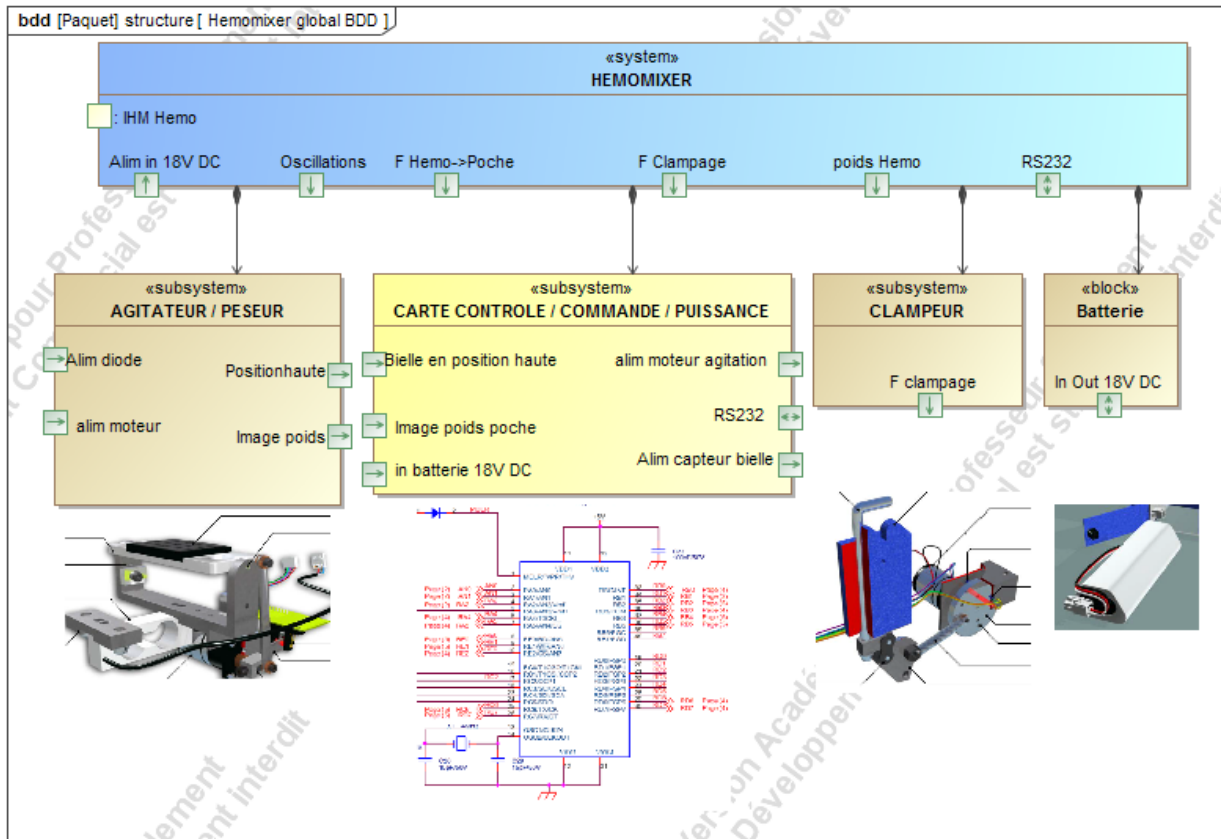
Ce diagramme structurel permet de présenter via des blocs (blocks) les éléments matériels ou logiciels et leur hiérarchie.

Éléments graphiques :

Bloc :	Lien de composition :	Port standard :	Port de flux :
« Block » Rectangle symbolisant un élément matériel ou logiciel. On y trouve le nom du bloc et on peut y trouver les parties (parts) le composant.	Composé d'un losange plein noir, d'un trait et d'une flèche pointant vers le bloc composant du précédent. On peut y trouver le nombre d'occurrence d'un composant.	Carré placé sur le contour d'un bloc représentant une commande logique (issu d'un bouton, d'un interrupteur par exemple)	Carré placé sur le contour d'un bloc représentant un flux d'information, de matière ou d'énergie entrant ou sortant (flèche uni ou bidirectionnelle)



Exemple : Hemomixer HX006





3.3 Diagramme de blocs internes « ibd »

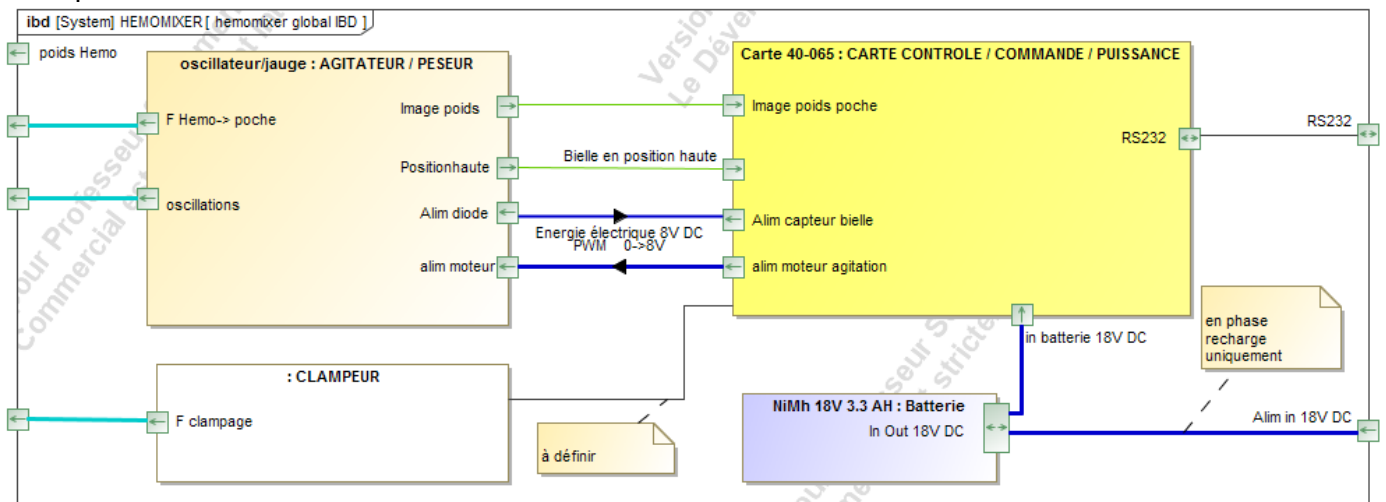
Ce diagramme structurel permet de présenter les blocs du bdd ainsi que les connexions de commande ou de flux d'information, de matière ou d'énergie entre ces blocs.

Il est complémentaire du bdd et permet de mettre en évidence les échanges au sein du système permettant son fonctionnement.

Eléments graphiques :

<p>Bloc : « Block » Rectangle symbolisant un élément matériel ou logiciel. On y trouve le nom du bloc et on peut y trouver les parties (parts) le composant.</p>	<p>Connexions de flux ou de commande : Trait avec ou sans flèche représentant les liens entre ports des différents blocs ou Interfaces Homme-Machine (IHM)</p>	<p>Port standard : Carré placé sur le contour d'un bloc représentant une commande logique (issu d'un bouton, d'un interrupteur par exemple)</p>	<p>Port de flux : Carré placé sur le contour d'un bloc représentant un flux d'information, de matière ou d'énergie entrant ou sortant (flèche uni ou bidirectionnelle)</p>

Exemple : Hemomixer HX006



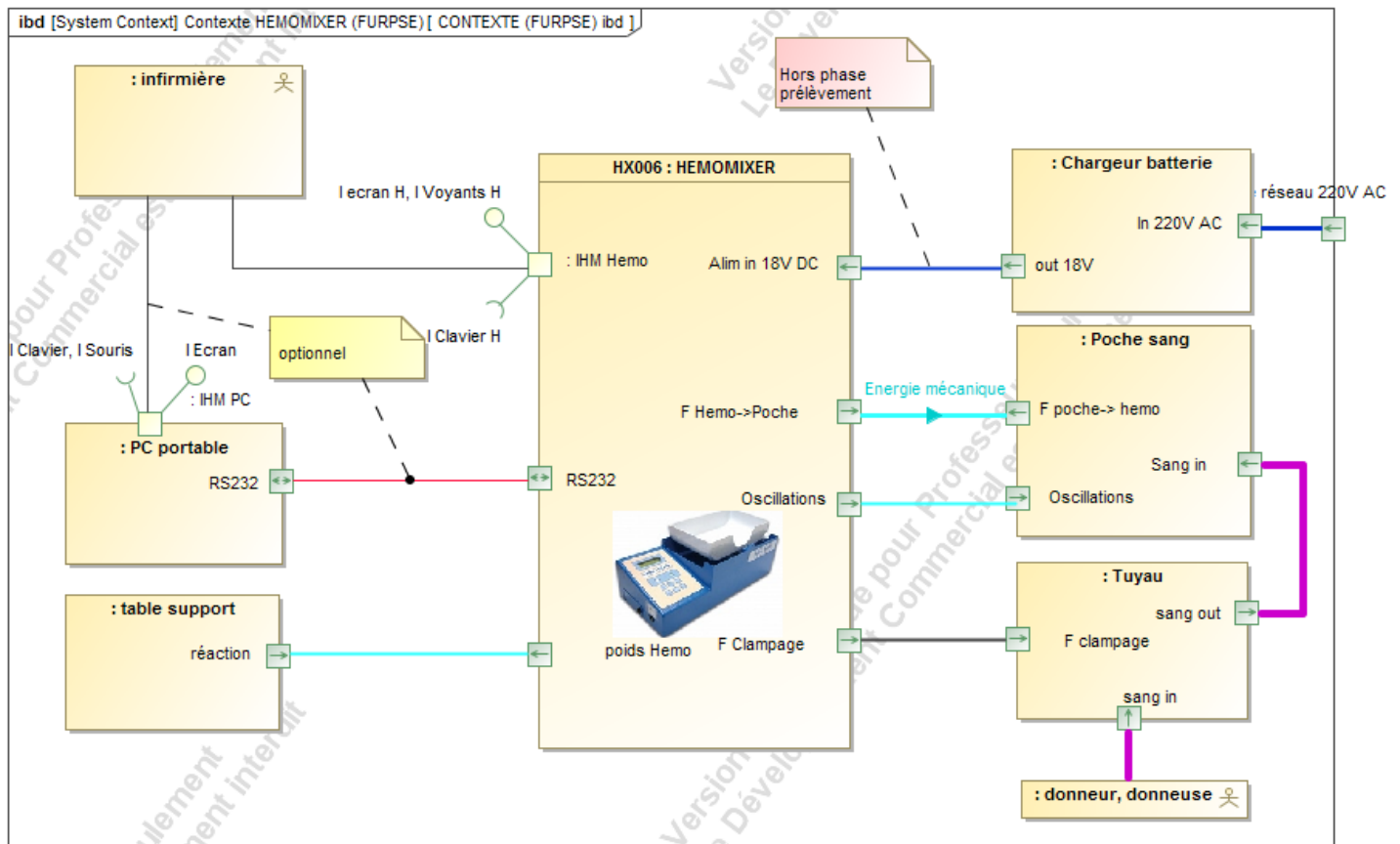
3.4 Diagramme de contexte

Ce diagramme est une extension non normalisée du langage SysML qui permet de définir les frontières de l'étude et la phase du cycle de vie du système dans laquelle on situe l'étude. Y figurent les acteurs ou entités extérieures considérées dans l'étude.

Il s'agit souvent de définir la phase d'utilisation normale du système.

Ceci est réalisé à l'aide d'un bdd, d'un ibd généralement.

Exemple : Hemomixer HX006



3.5 Remarques sur les diagrammes

- Dans tous les diagrammes présentés précédemment, on peut trouver un cartouche de présentation en haut à gauche du cadre du diagramme pour présenter son type (requirement, use case, bdd ou ibd), le nom du système et le nom du diagramme.

ibd [System] HEMOMIXER [hemomixer global IBD]

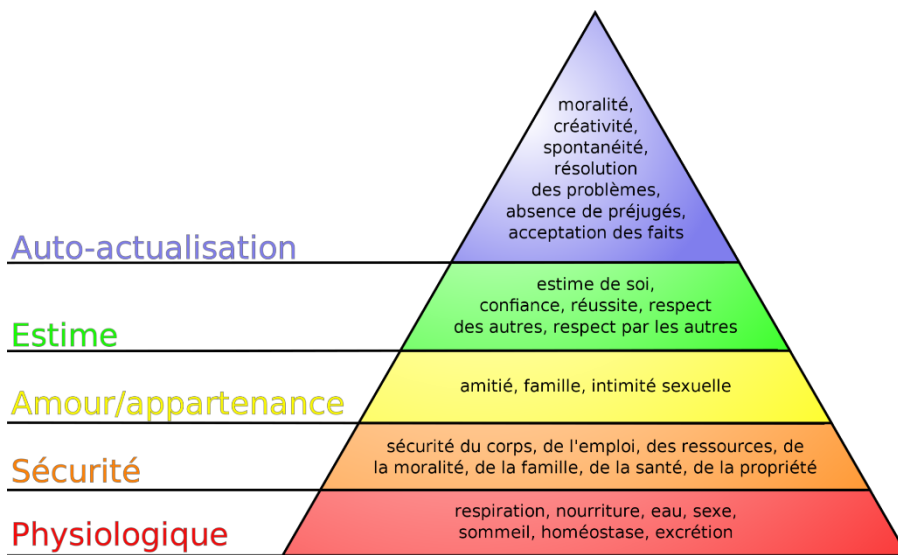
à définir

- On peut aussi trouver des « post-it » de commentaire sur les liens ou blocs.

4 IMPACTS ENVIRONNEMENTAL ET SOCIÉTAL

Dans le cadre des études en sciences industrielles de l'ingénieur, on s'intéresse aux systèmes développés, produits et généralement commercialisés correspondant aux besoins croissants des humains dont les sociétés sont toujours elles-mêmes en croissance. Les impacts environnementaux et sociétaux deviennent de plus en plus importants à prendre en compte dans les différentes phases de vie du système ou produit.

4.1 Besoins et croissance



La pyramide des besoins, dite pyramide de Maslow, est **une représentation pyramidale de la hiérarchie des besoins qui interprète la théorie de la motivation basée à partir des observations réalisées** dans les années 1940 par le psychologue **Abraham Maslow**

Depuis la 2^{ème} guerre mondiale, les évolutions économiques, politiques, scientifiques et technologiques ont permis de répondre à des besoins de plus en plus « élevés » dans cette pyramide.

La production de systèmes industriels correspond à des besoins humains :

- Accès à l'eau et la nourriture
- Accès à l'énergie
- Accès aux transports
- Accès à la santé
- Accès à la communication

La consommation d'énergie et de matières premières correspondant à ces enjeux est toujours en croissance. On prévoit que 9 milliards d'humains vivront en 2050 dont 75% dans les villes.

Les besoins en énergie par humain sont également en croissance et il faut y répondre, à défaut de réussir à infléchir cette tendance pour l'instant (certains estiment qu'à terme la décroissance est inévitable).

Les besoins énergétiques du corps humain et apportés par la nourriture est environ de $10\text{kJ} \approx 2000\text{kcal}$.

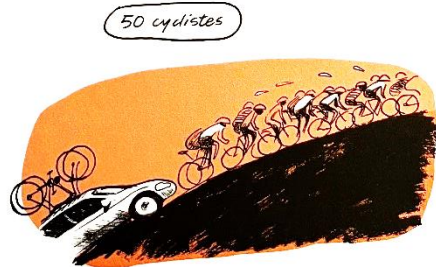
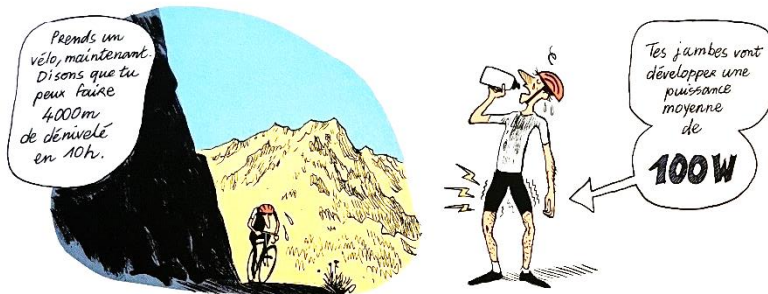
A l'échelle de notre corps, la consommation de sucre (glucide raffiné) et la consommation ou le stockage d'énergie correspondant est passée de 600g/ans/personne fin 18^e siècle à 30 à 60kg/ans/personne aujourd'hui. 1g de glucide peut produire 4kcal soit 16,8kJ.

C'est un des nombreux exemples de l'adaptation de l'humain à son environnement depuis la révolution industrielle : on utilise une plante qui a poussé grâce à l'eau et l'énergie solaire (canne à sucre ou betterave),

on dépense beaucoup l'énergie pour la cultiver, la récolter, la transformer, raffiner le produit pour obtenir une « bombe énergétique ». Déjà à l'échelle de notre corps, l'apport d'énergie a un impact plus ou moins important sur l'environnement et demande plus ou moins d'énergie en amont.

Un humain peut produire (avec un peu de bonne volonté) une puissance musculaire de 100W environ pendant la journée.

Extrait de l'excellent « le monde sans fin » Jancovici-Blain ci-dessous :



Equivalences :

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

$$1 \text{ kW.h} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ W.s}$$

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ Pa.m}^3$$

$$1 \text{ eV} = 1,602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 41,8 \text{ GJ}$$

$$1 \text{ tec} = 29,3 \text{ GJ}$$

$$1 \text{ ch} = 735,5 \text{ W}$$

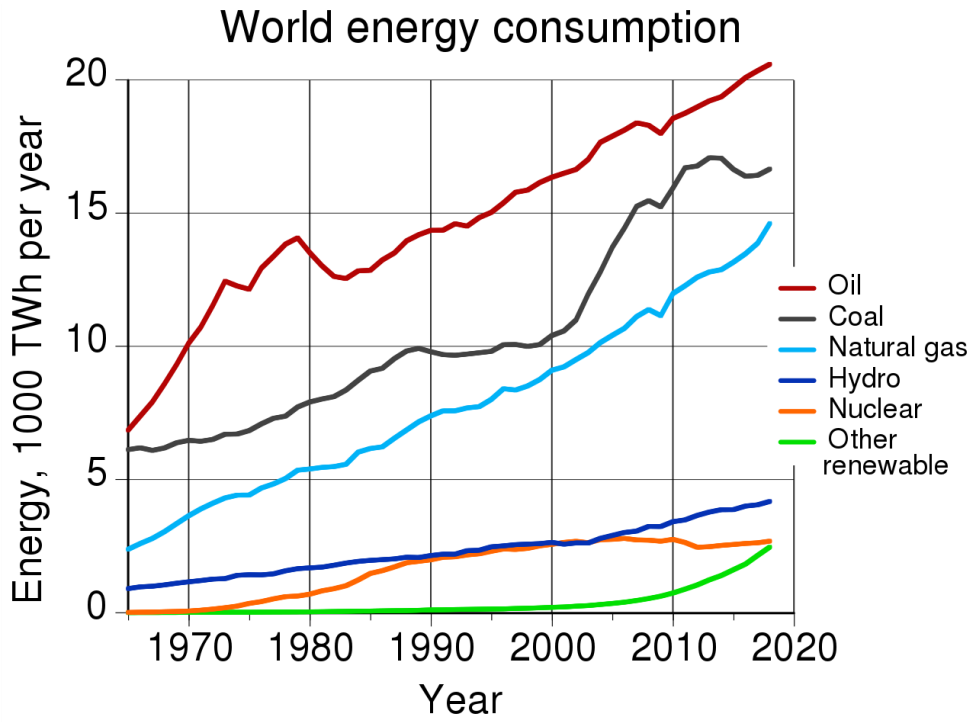
tep : tonne équivalent pétrole

tec : tonne équivalent charbon

L'utilisation du charbon puis des hydrocarbures a permis de remplacer beaucoup d'énergie musculaire par celle fournie par des machines mues par des moteurs thermiques.

1l de carburant hydrocarbure peut fournir 2 à 4kWh, ce qui remplace l'énergie musculaire de 400 êtres humains pendant une heure (ou 40 êtres humains pendant 10h) !!

Un Français utilise 50MWh/an \approx 180GJ/an de nos jours. Avant la révolution industrielle, un Français utilisait à peu près 0J !



4.3 Ressources et environnement

Les ressources en eau, énergie et matières premières ne sont pas infinies, et l'actualité nous le rappelle très régulièrement maintenant (arrêt de centrale nucléaire pour préserver les fleuves et rivières utilisées pour le refroidissement, gaz russe, lithium pour les batteries, ...)

L'énergie est une grandeur physique quantifiant le changement d'état d'un système.

Par exemple un objet soumis à une force se déplaçant change d'état.

L'unité d'énergie est le joule noté J : $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$

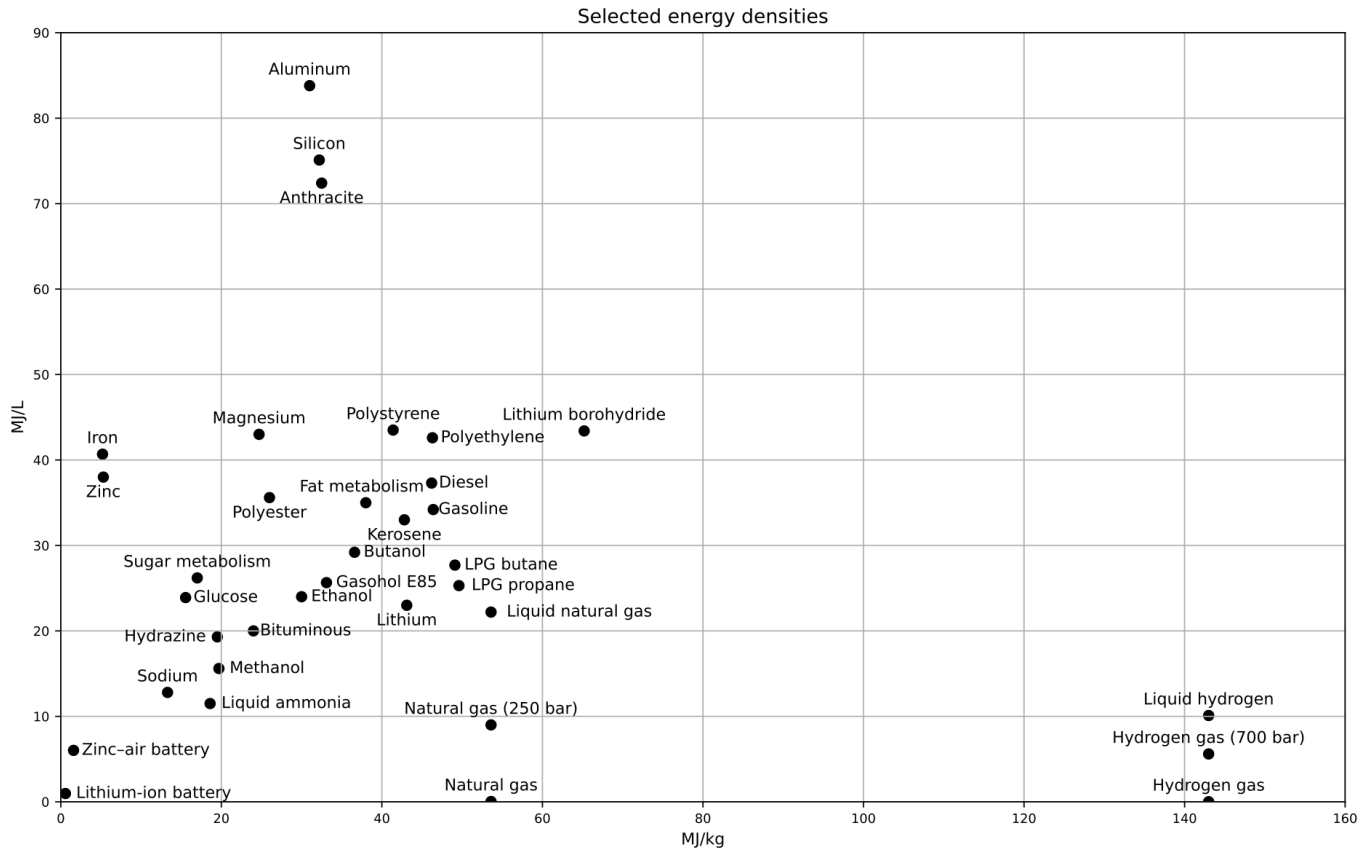
Les systèmes industriels utilisent des machines qui remplacent l'énergie musculaire de l'humain.

La production d'énergie dite primaire est répartie selon le tableau suivant :

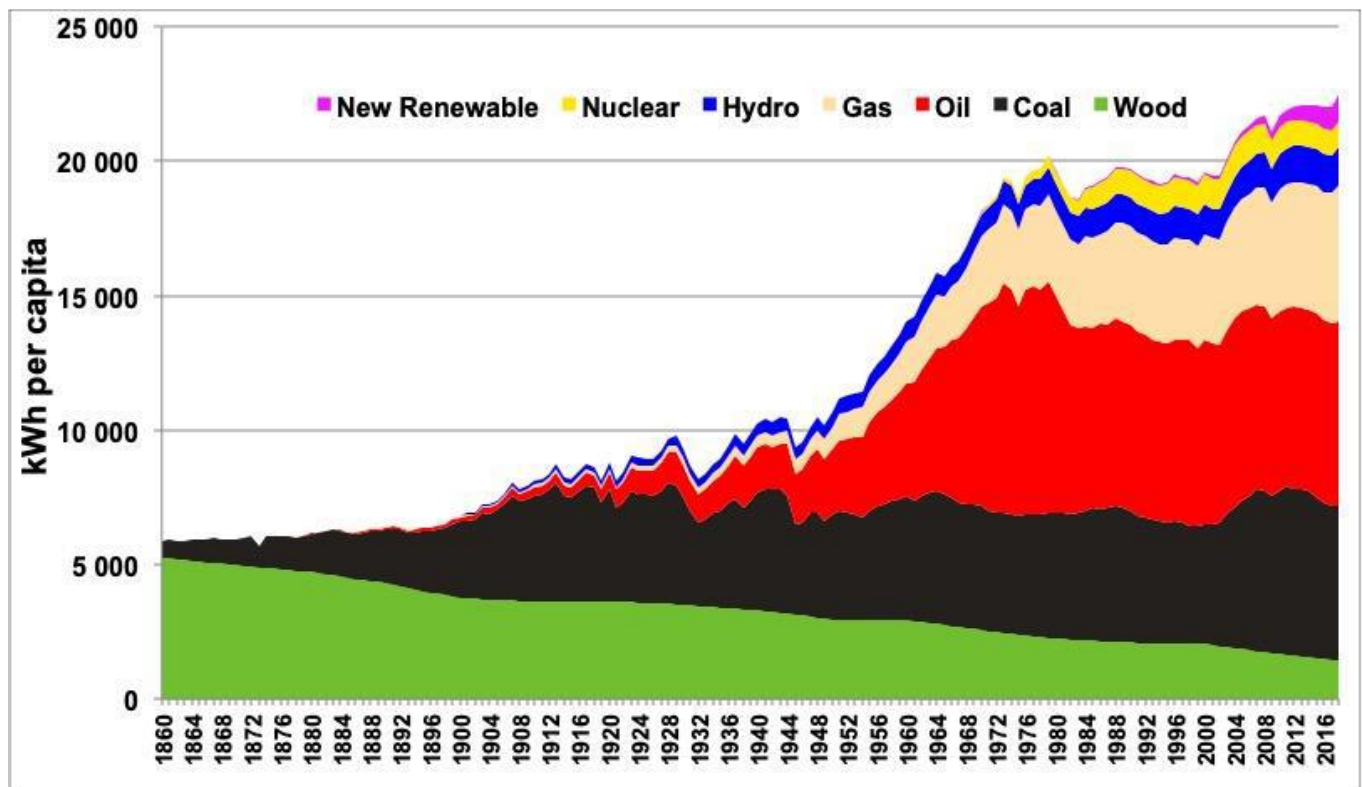
Réserves mondiales d'énergies 2020 et production annuelle 2021 par sources d'énergie					
Type d'énergie	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en EJ)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en EJ)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole	245 Gt	10 249	25 %	184	56
Gaz naturel	206 Tm ³	7 832	19 %	145	54
Charbon	1 076 Gt	22 436	55 %	160	139
Total fossiles		40 517	100 %	489	83
Uranium	6,15 Mt	2 133	5 %	25	91
Thorium	6,4 Mt	Nd	nd	Ns	ns
Hydroélectrique	21 PWh/an	75 (par an)		40	ns
Énergie éolienne	39 PWh/an	140 (par an)		6,7	ns
Solaire	1 070 000 PWh/an	3 849 000 (par an)		3,7	ns
Biomasse	3 000 EJ/an	3000 (par an)		56,5	ns

Les **énergies renouvelables** (parfois abrégées **EnR**) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

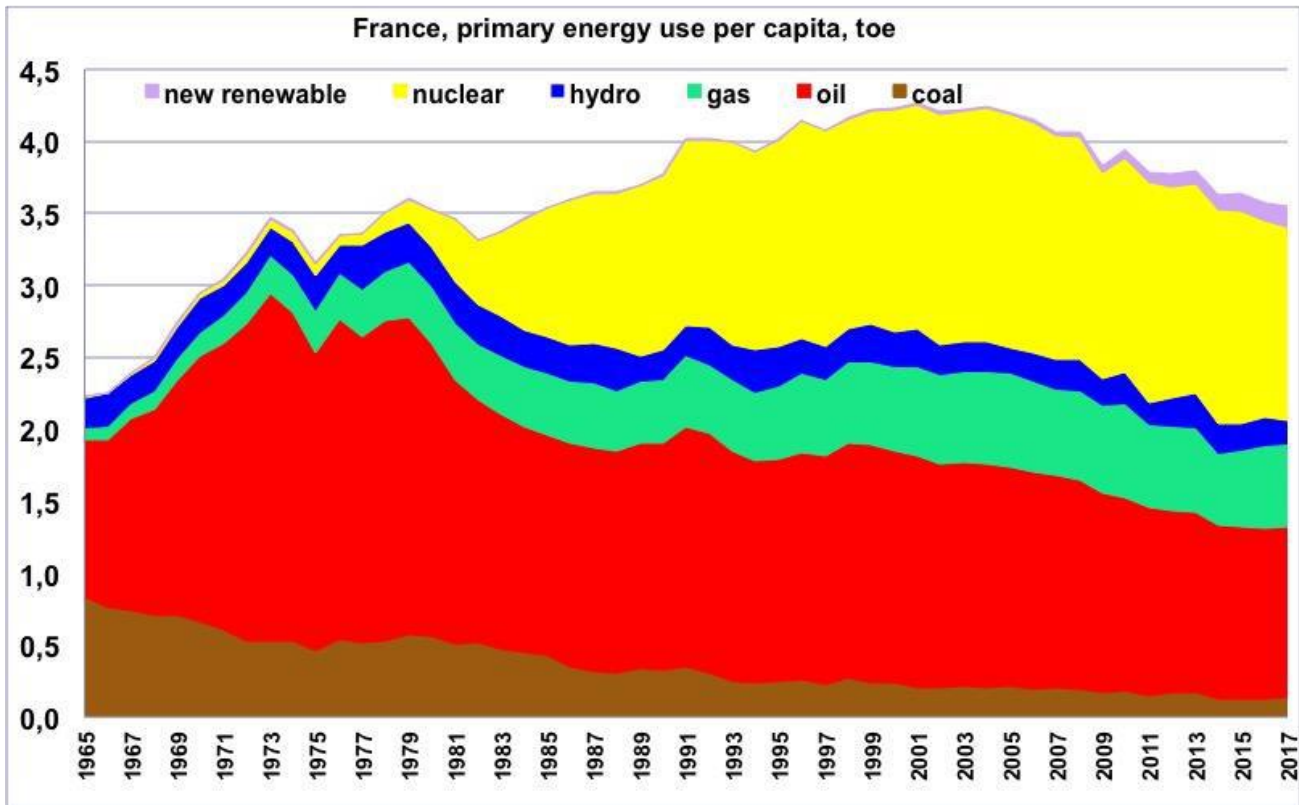
La France a un objectif (politique) de production automobile 100% électrique en 2035. C'est bien, mais il ne faut pas oublier qu'il n'y a pas d'énergie sale ou propre dans l'absolu. Choisir une énergie, c'est choisir un type de transformation avec des avantages et des inconvénients.



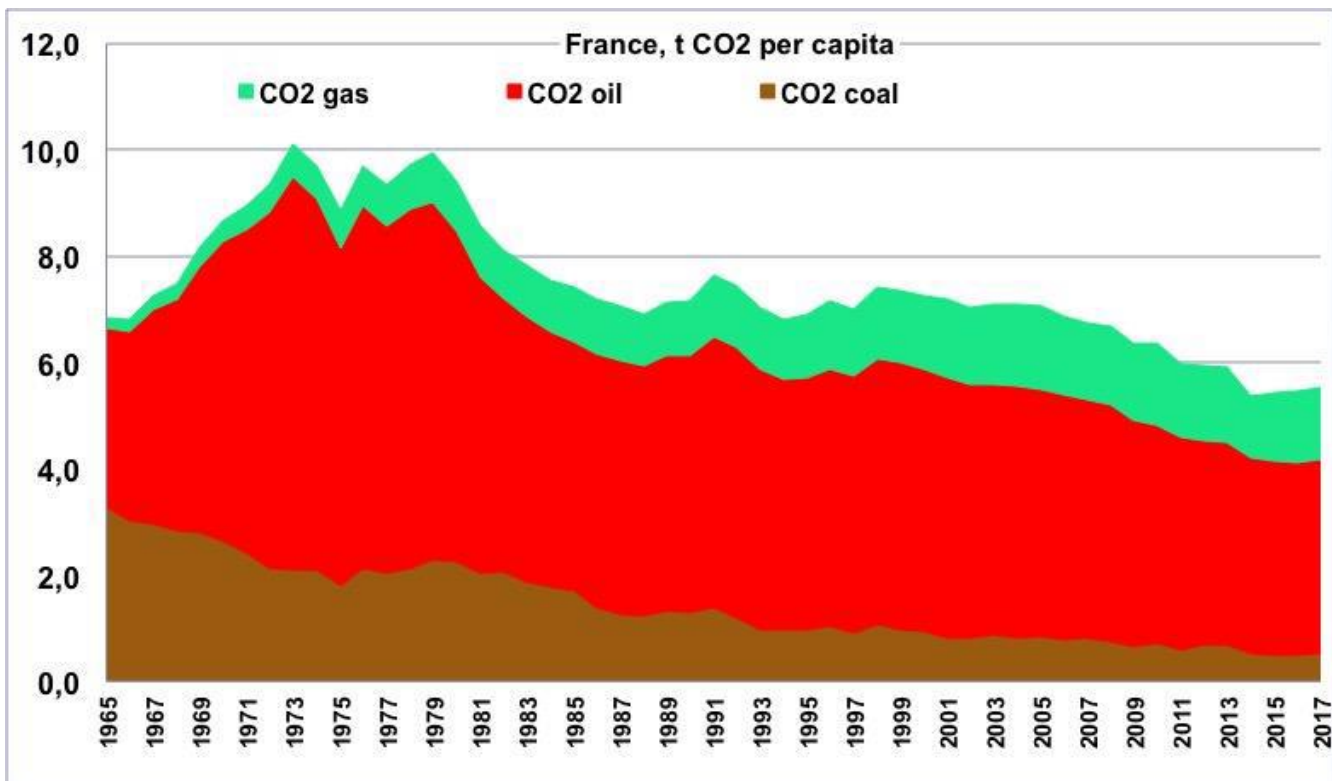
La densité énergétique des hydrocarbures est très intéressante. Cette source d'énergie présente l'inconvénient de produire beaucoup de polluants dont le gaz à effet de serre CO2.



Consommation d'énergie primaire par personne dans le monde depuis 1860 en kW.h



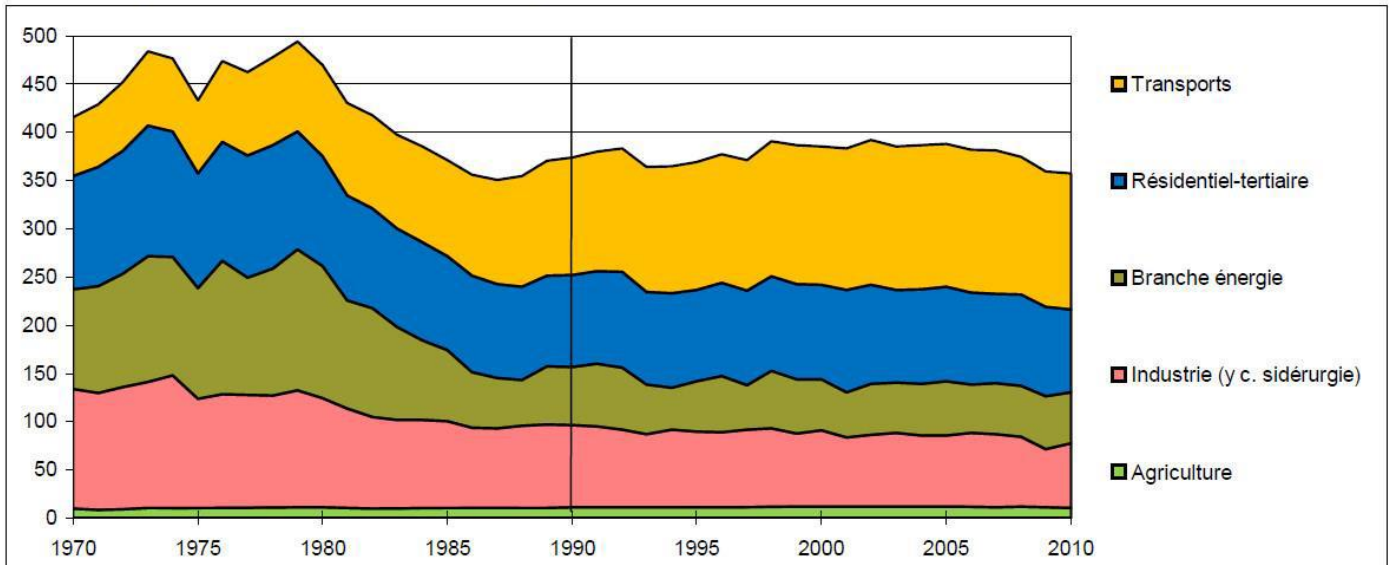
Consommation d'énergie primaire par personne en France, bois exclu, depuis 1965, en tep



Evolution des émissions de CO2 d'origine fossile par personne en France depuis 1965

Émissions de CO₂ par secteur

Données corrigées des variations climatiques, en Mt CO₂

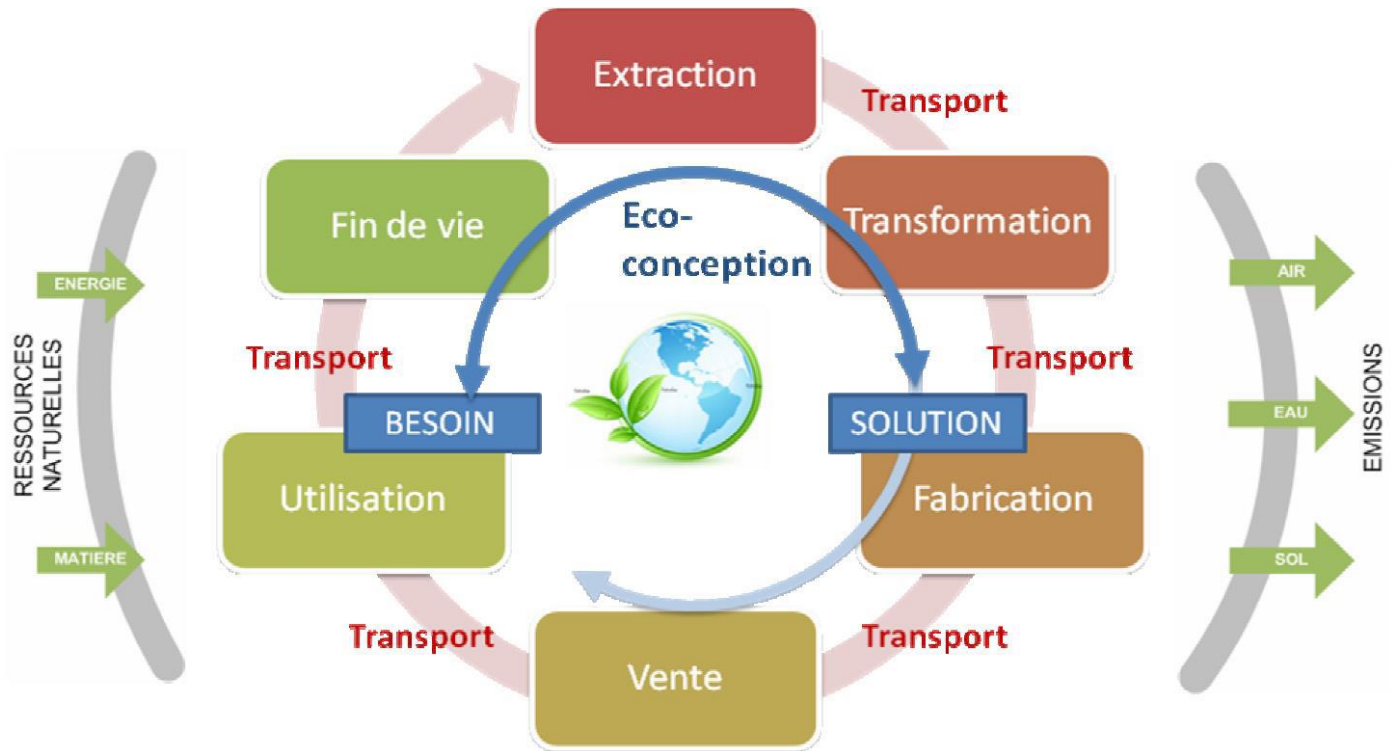


Source : SOeS, bilan de l'énergie 2010

Emissions de CO₂ en France par grands secteurs

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 ou système aux côtés de critères classiques comme le coût.

4.4 Cycle de vie : étapes



A chaque étape un produit consomme de l'énergie et des matières premières non renouvelables, crée des impacts sur l'air, l'eau, le sol.

La fin de vie d'un produit peut donner lieu à recyclage, enfouissement, incinération, compostage.

Le **recyclage** a un coût énergétique et environnemental qui est généralement compensé par la limitation d'extraction et de production de matière engendrée.

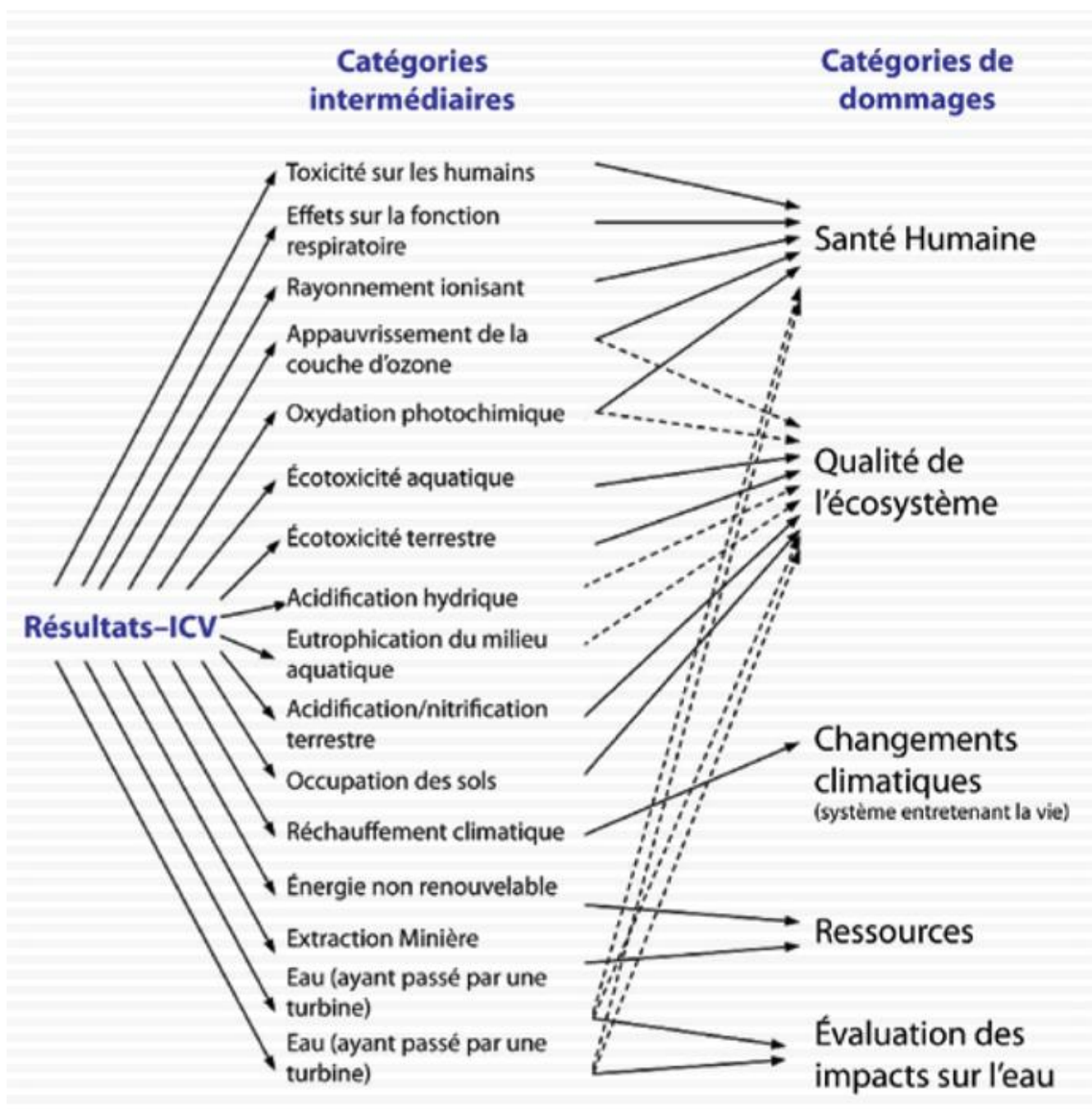
Pour les matériaux non renouvelables (plastique, verre, métal) le recyclage présente moins d'impacts (GES et consommation énergétique) que l'enfouissement et l'incinération.

Pour les matériaux renouvelables (papier, carton) le **recyclage** a :

- Plus d'impact que l'incinération si l'énergie produite par l'incinérateur remplace les carburants fossiles.
- Moins d'impact que l'incinération si l'énergie produite par l'incinérateur remplace le biocarburants.
- Moins d'impact que l'enfouissement.

4.6 Méthodes d'analyse d'impact et catégories d'impact

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



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	Chlorofluorocarbone [kg éq. CFC11] (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 humaine	Dichlorobenzène [kg éq. 1,4 DCB]
Nuisances	Acoustiques : bruit	
	Visuelles : aspect visuel	
	Olfactives : odeur	
	Vibrations	
Altération des écosystèmes	Désertification	
	Déforestation	
	Perte de biodiversité	

Caractérisation des impacts ou calcul du score d'impact

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

$$SI_i = \sum_S FI_{S,i} \cdot M_S$$

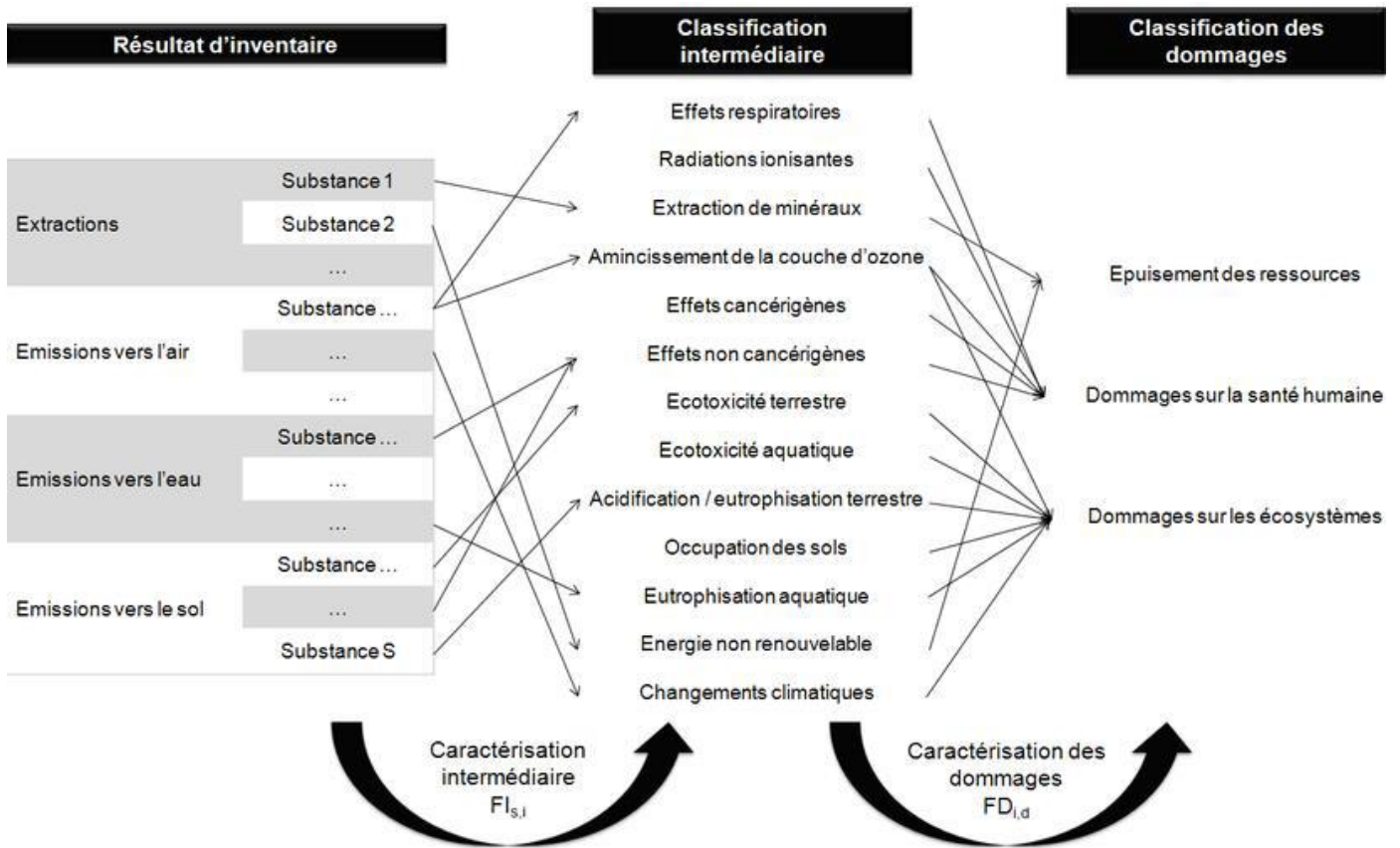
Où

SI_i : score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie d'impact i

$FI_{S,i}$: facteur de caractérisation intermédiaire de la substance S pour la catégorie d'impact intermédiaire i

M_S : masse émise ou extraite de la substance S

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

Exemple de gaz à effet de serre

Le potentiel de réchauffement climatique (GWP Global Warming Potential) 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 » généré par kg de ce gaz, injecté instantanément dans l'atmosphère.

Le GWP est rapporté au CO₂ et il se calcule pour chaque gaz à effet de serre k de la manière suivante :

$$GW P_k = \frac{\int_0^T a_k c_k(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt}$$

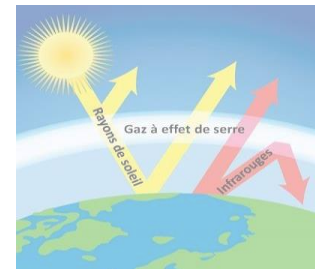
Où

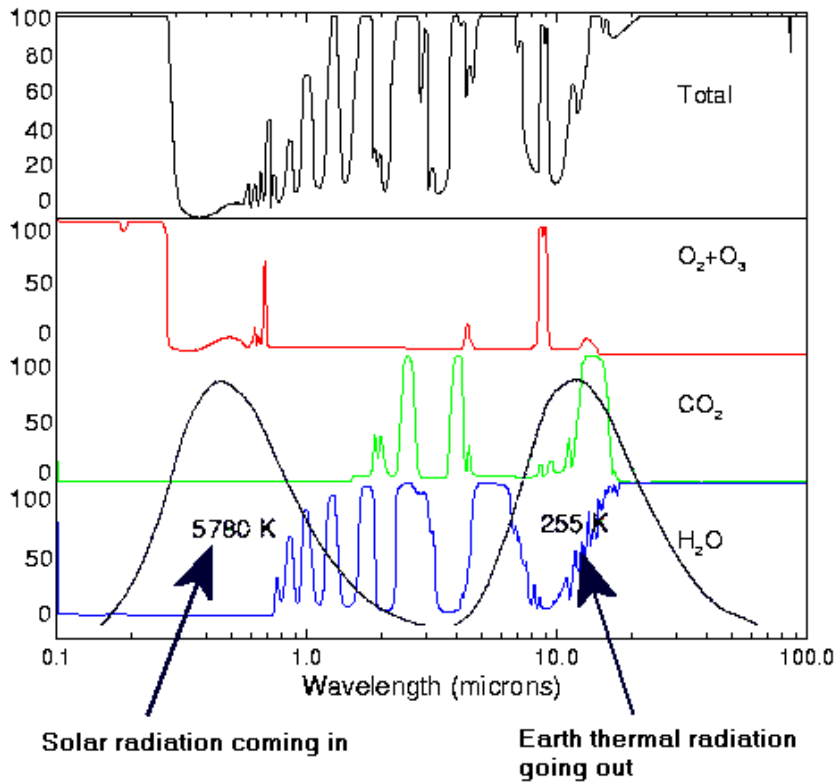
$GW P_k$: potentiel de réchauffement climatique pour le gaz k ;

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

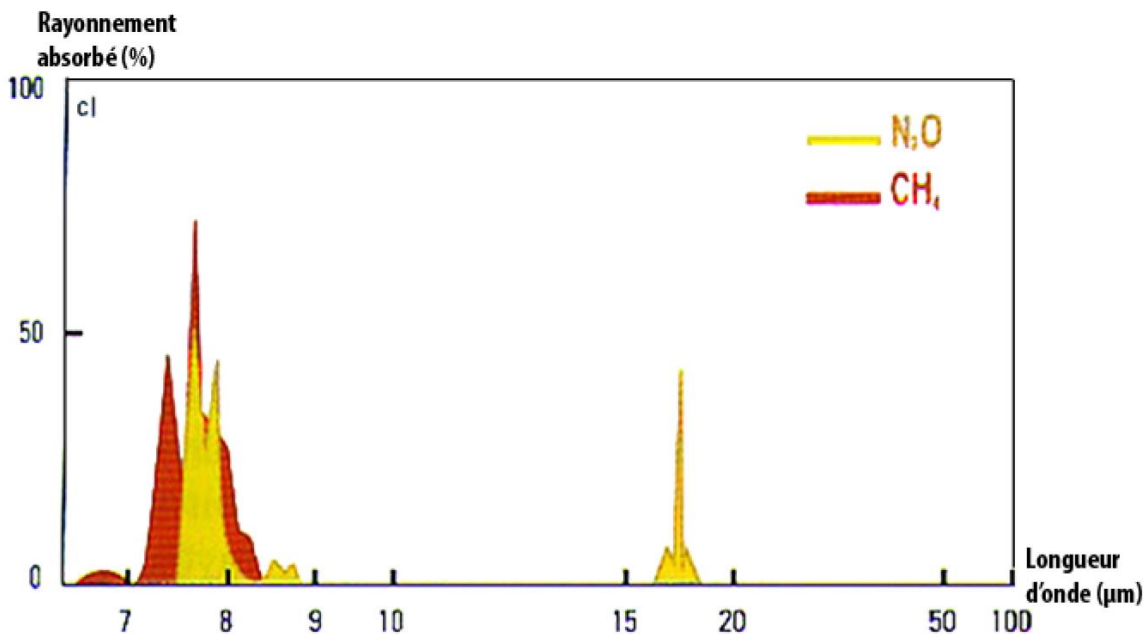
$c_k(t)$: concentration du gaz k restant au temps t après son émission ;

L'effet de serre est naturel et nécessaire à la vie sur terre et on peut quantifier cet effet par le diagramme suivant présentant l'absorption des rayonnements thermiques (autour de l'infrarouge) des gaz naturellement présents dans notre atmosphère.





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 (N₂O) et le méthane (CH₄) qui sont de puissants gaz à effet de serre.



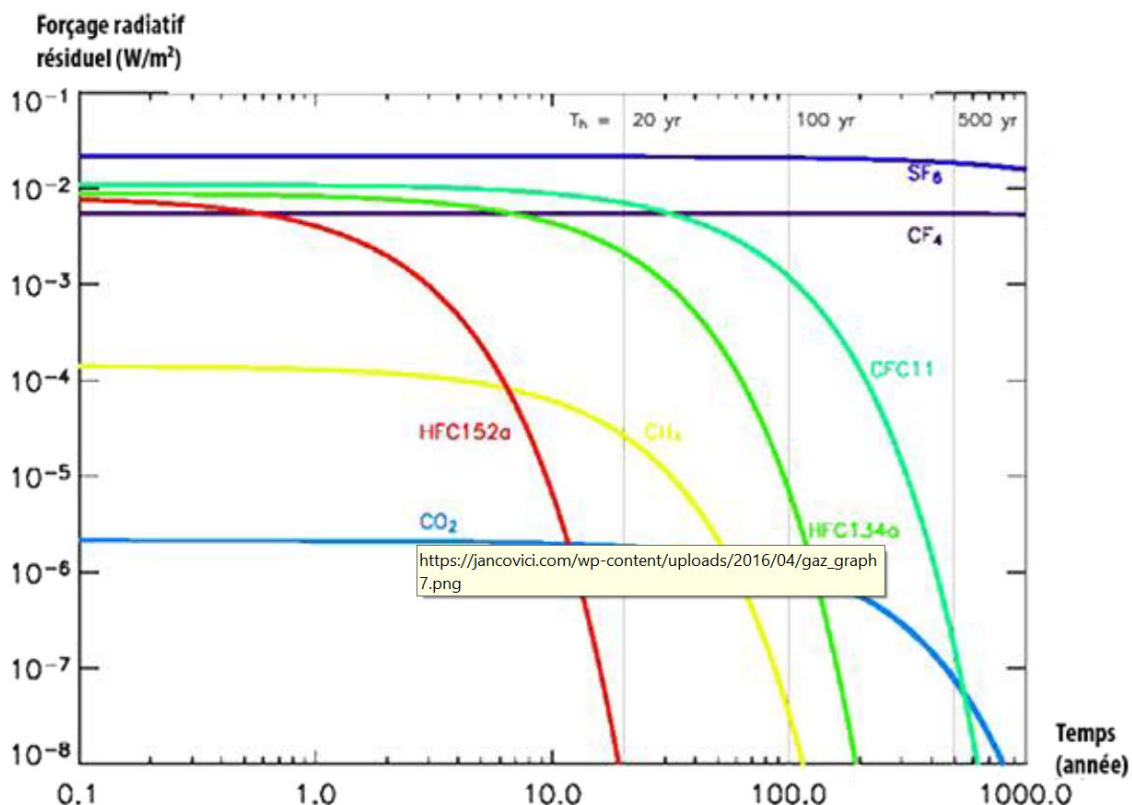
Pourcentage du rayonnement absorbé (en ordonnée) selon la longueur d'onde en micromètres (en abscisse) pour le méthane et le protoxyde d'azote dans l'atmosphère.

L'intensification de l'effet de serre est évaluée selon l'équation :

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

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-après, 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 un ensemble de phénomènes, difficiles à modéliser.



Forçage radiatif résiduel, au cours du temps, pour 1 million de tonnes de gaz émis à t=0

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.

Gaz	Formule	GWP relatif / CO2 (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

Exemples de productions de matières et d'énergies :

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

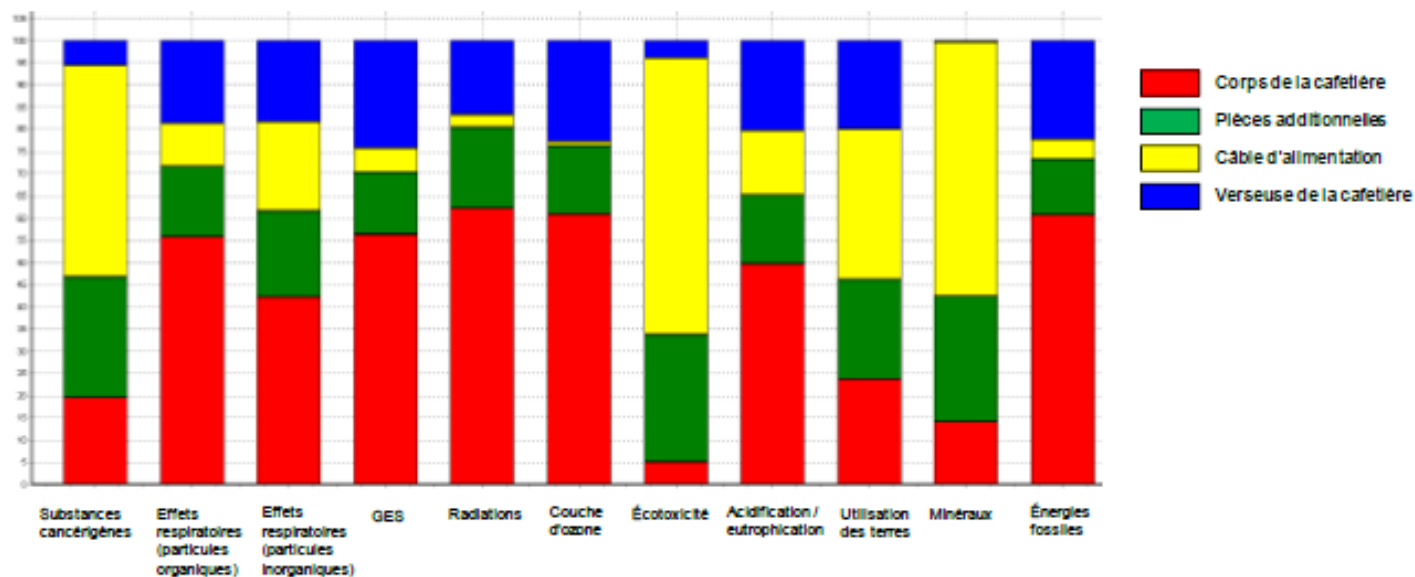
Exemples d'émissions éq. CO₂ pour la production d'énergies

4.7 Bilan

L'analyse du cycle de vie réalise un bilan détaillé et quantitatif des entrées et des sortie mesurées aux frontières 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.

4.8 Exemple : Analyse du cycle de vie d'une cafetière

Nous traiterons l'exemple d'une cafetière.



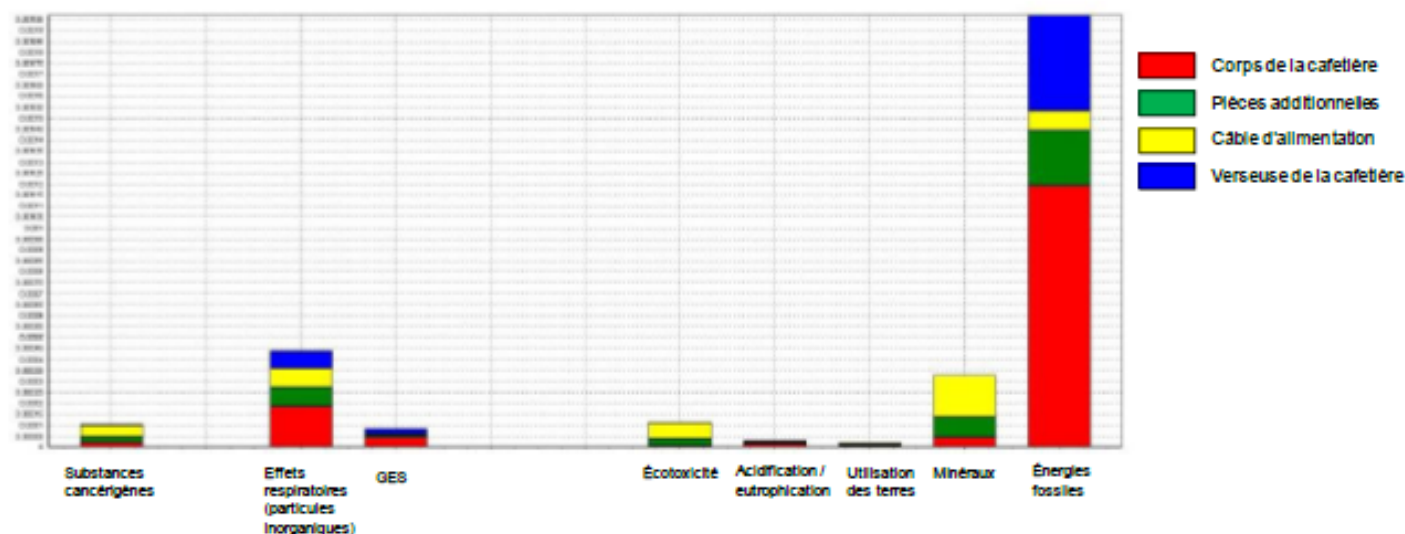
Impacts environnementaux dans le cas d'une cafetière

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 ?

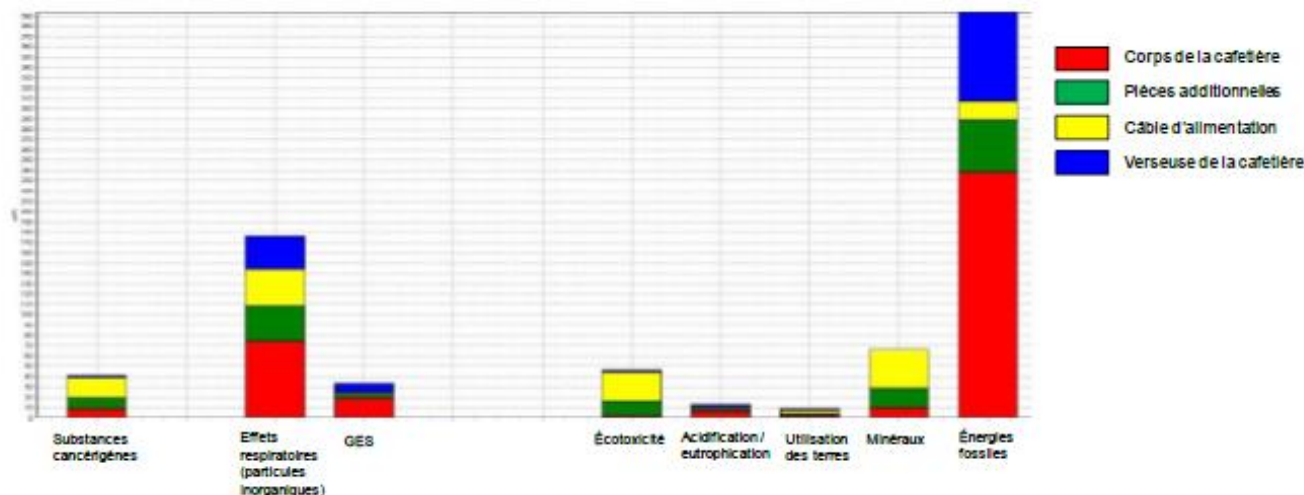
C'est la phase de normalisation : les différentes familles d'impacts sont comparées avec les effets environnementaux causés par un européen moyen sur une année.

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.

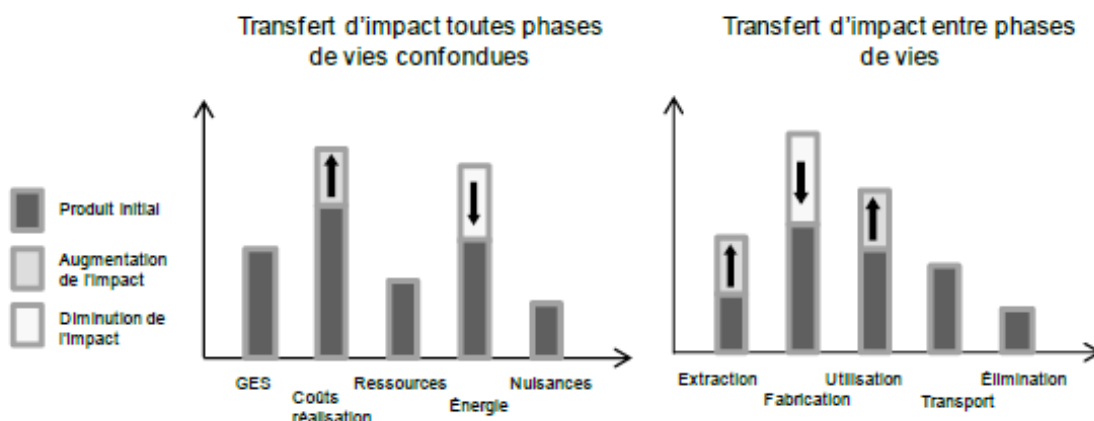


Etape de pondération

4.9 Notion de transfert d'impact sur l'écoconception

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.

Exercice :

Inscrivez vous sur le site de l'ADEME Agence indépendante

[Bilans - Bilans GES \(ademe.fr\)](https://bilans.ademe.fr/)

Inscrivez vous pour accès à la base empreinte

[Base Empreinte® \(ademe.fr\)](https://base-empreinte.ademe.fr/)

Trouver les émissions de GES en kg eq. CO₂/km d'une voiture électrique en France continentale ainsi que pour une voiture hybride. Comparer les.