



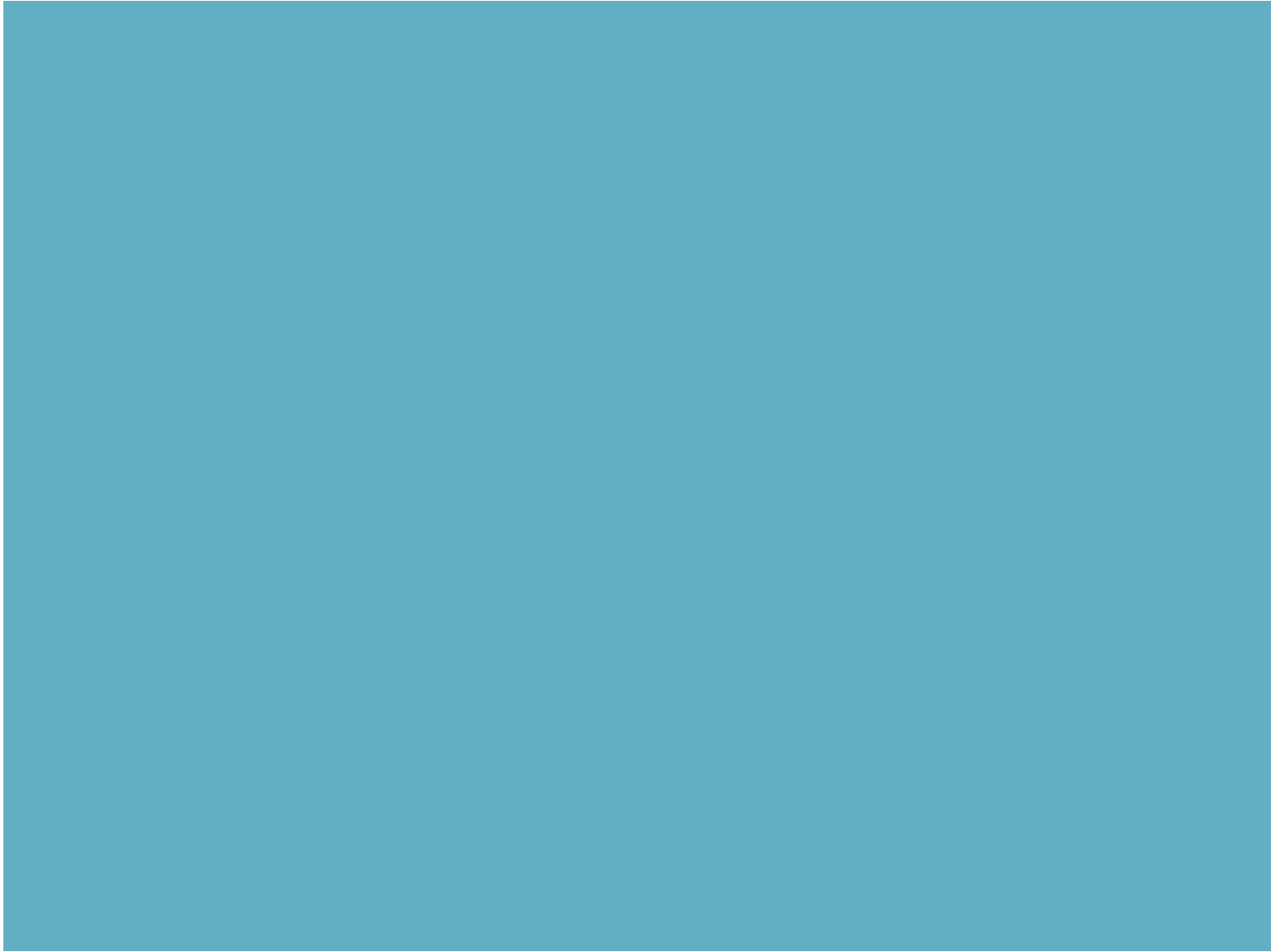
Enjeux et opportunités de la démarche d'éco-conception

Ludovic MONTASTRUC



Objectifs du cours

- Comprendre la démarche d'une analyse de cycle de vie
- Connaître les bases de données et les méthodes existantes
- Etre capable d'analyser et de critiquer une analyse de cycle de vie déjà réalisée





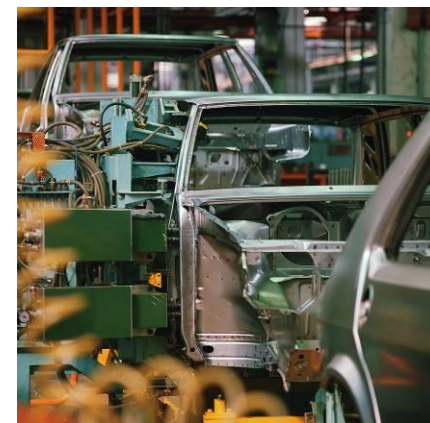
Le cycle de vie



Incinération et
mise en
décharge



Extraction de
matières premières



Conception et
production

Récupération

Réutilisation et
recyclage

Recyclage des
matériaux

Réutilisation

Utilisation et
maintenance

Emballage et
distribution





Les débuts : « de l'écobilan à l'ACV »

- **Prise en compte de l'environnement traditionnellement déclinée**
 - soit par impact environnemental (déchets, pollutions, consommation d'énergie...),
 - soit par secteur d'activités (industries, transports...),
- **Approches trop parcellaires** pour justifier du bien fondé environnemental des efforts à réaliser : la diminution de tel ou tel impact modifiait les autres caractéristiques des systèmes considérés, sans que l'on puisse évaluer la pertinence globale de ces modifications :
- **Exemples :**
 - un changement de matériau permettant de diminuer les consommations d'énergie et de matières mais modifiant la recyclabilité finale des produits,
 - le choix d'une filière de valorisation permettant de diminuer le recours à la mise en décharge mais affectant la qualité de l'air...



Les écobilans

- Au début des années 90 :
nécessité de mettre en oeuvre des **approches multi-critères** (consommation de matières et d'énergies, émissions dans l'air et dans l'eau, déchets), prenant en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits, de leur fabrication à leur élimination finale en passant par leur phase d'utilisation : **les écobilans.**



De l'écobilan à l'ACV

- Au départ : approches qualifiées d'expérimentales voire partiales (écobilans menés à des fins exclusives de marketing ou de lobby).
- Par la suite, le développement de la normalisation internationale (famille des normes ISO 14040) a fixé des bases méthodologiques et déontologiques et retenu le terme:

« Analyse de cycle de vie » (ACV)

en lieu et place d'« écobilan »

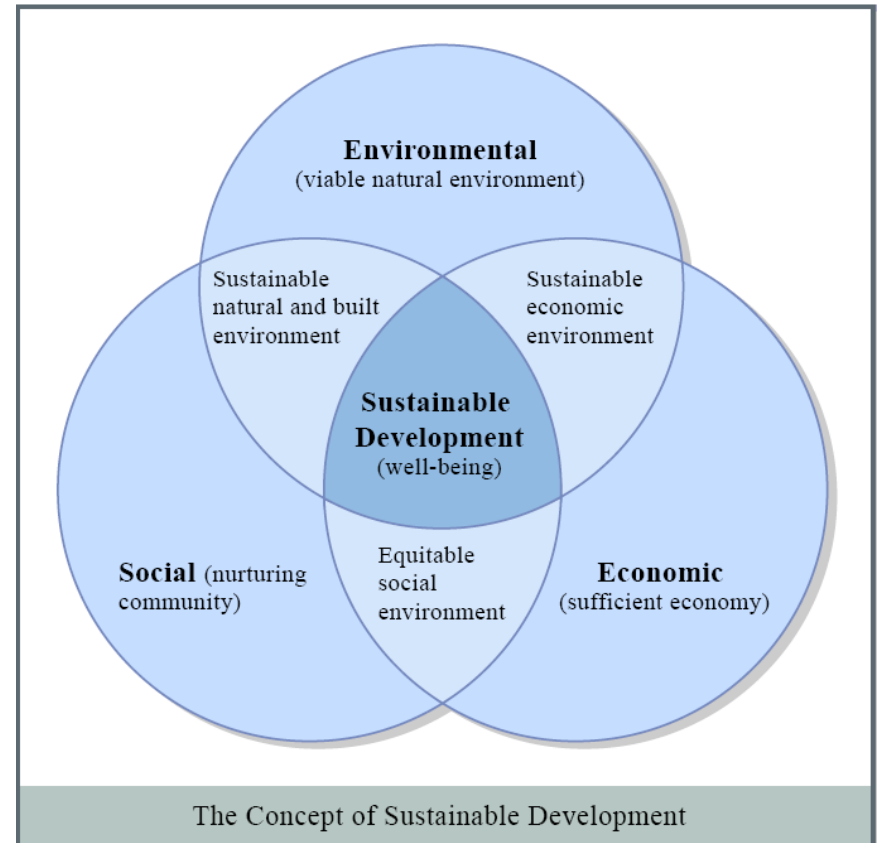
(nom d'une société commerciale, française à l'origine).

- Depuis 1997, harmonisation des pratiques: résultats plus robustes et fiables et effort de communication



Remarques

- Dans le domaine de l'évaluation globale et multicritères des impacts environnementaux,
- **ACV** : outil le plus abouti au sein de démarches de développement durable,
- Mais ne traite que **de la dimension environnementale** (voire, dans certains cas rares, économique) et non de l'axe social ou sociétal du développement durable.





Principe général de l' ACV

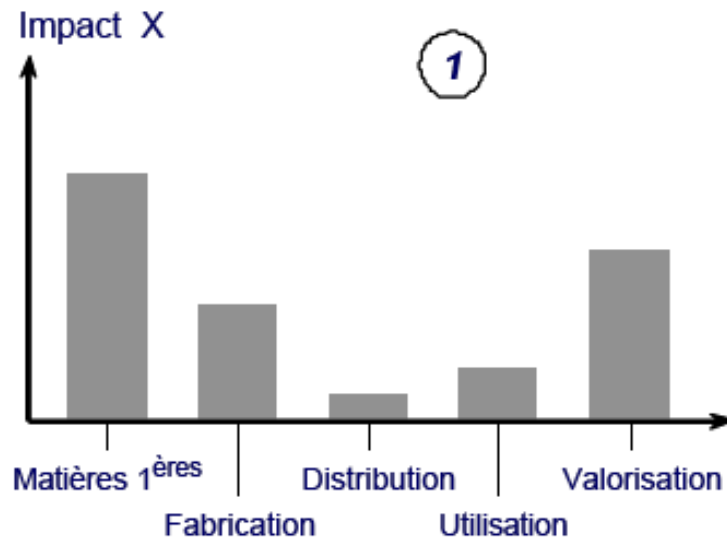
Définition

- L' analyse du cycle de vie évalue l' impact environnemental d' un produit, d' un service ou d' un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie.
- Cet outil est employé pour comparer les charges environnementales de différents produits, processus ou systèmes entre eux, ainsi que les différentes étapes du cycle de vie d' un même produit.

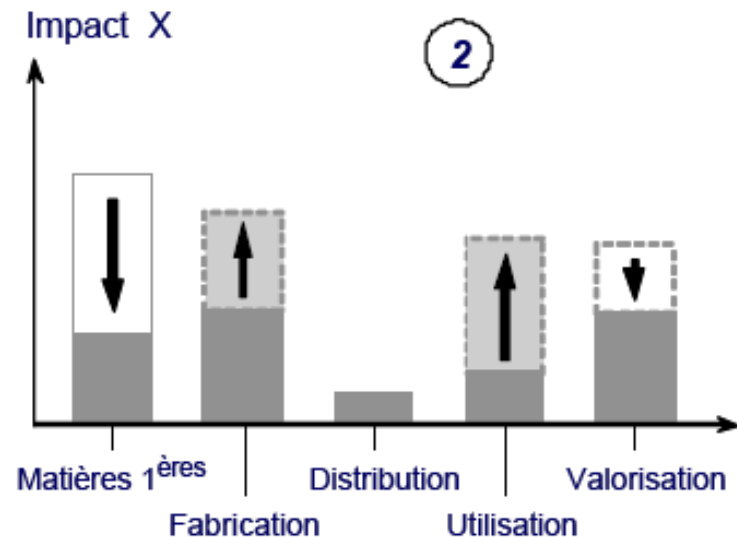


A quoi sert une ACV?

- ✓ Identifier les principales sources d'impacts environnementaux
- ✓ Eviter ou, le cas échéant, arbitrer les déplacements de pollutions



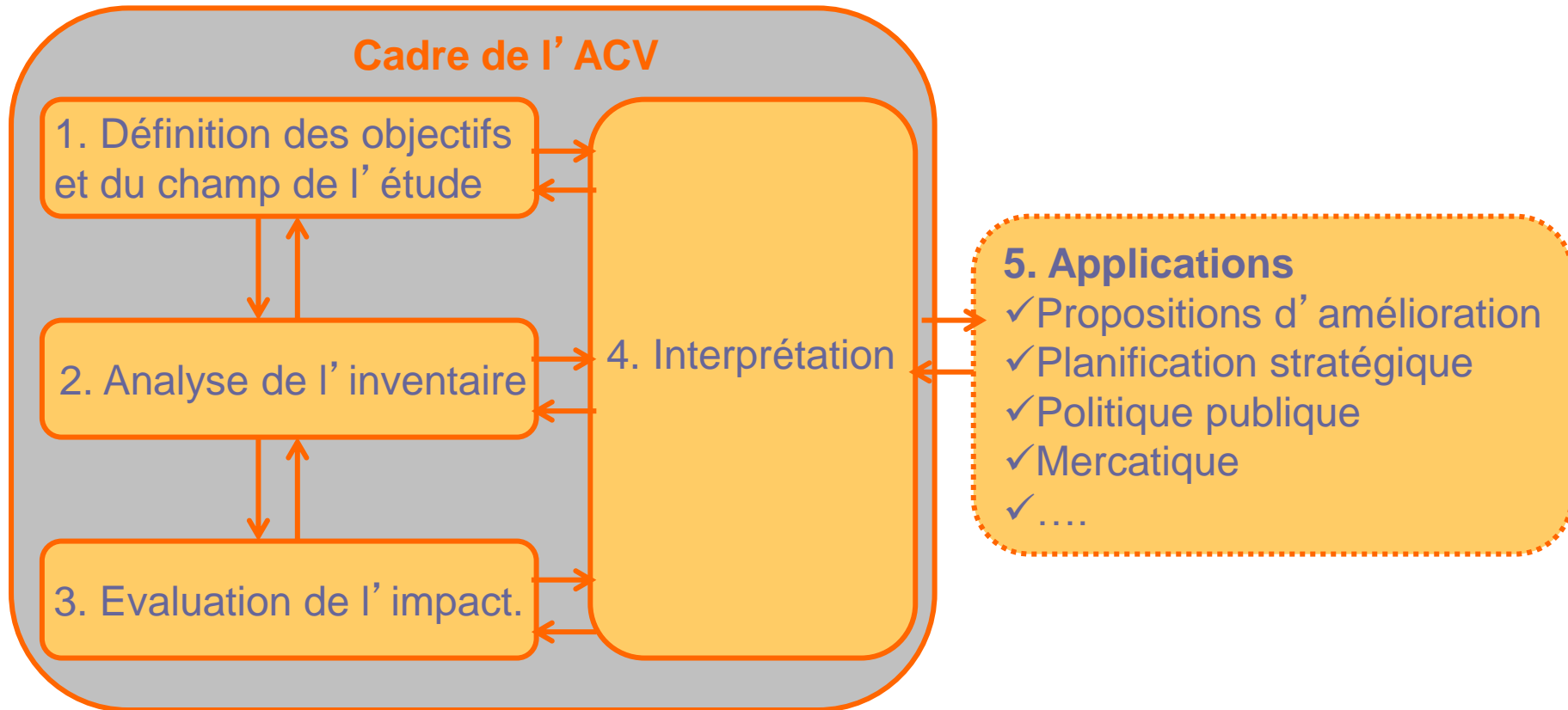
L'analyse de l'existant ① montre que l'impact environnemental majeur est généré au niveau des matières premières.



L'une des solutions envisagées ② réduirait cet impact au niveau des matières premières mais l'aggraverait à d'autres étapes : cette solution constituerait un transfert de pollution.



ACV : 4 étapes



ISO Standards (ISO 14041, 14042, 14043)



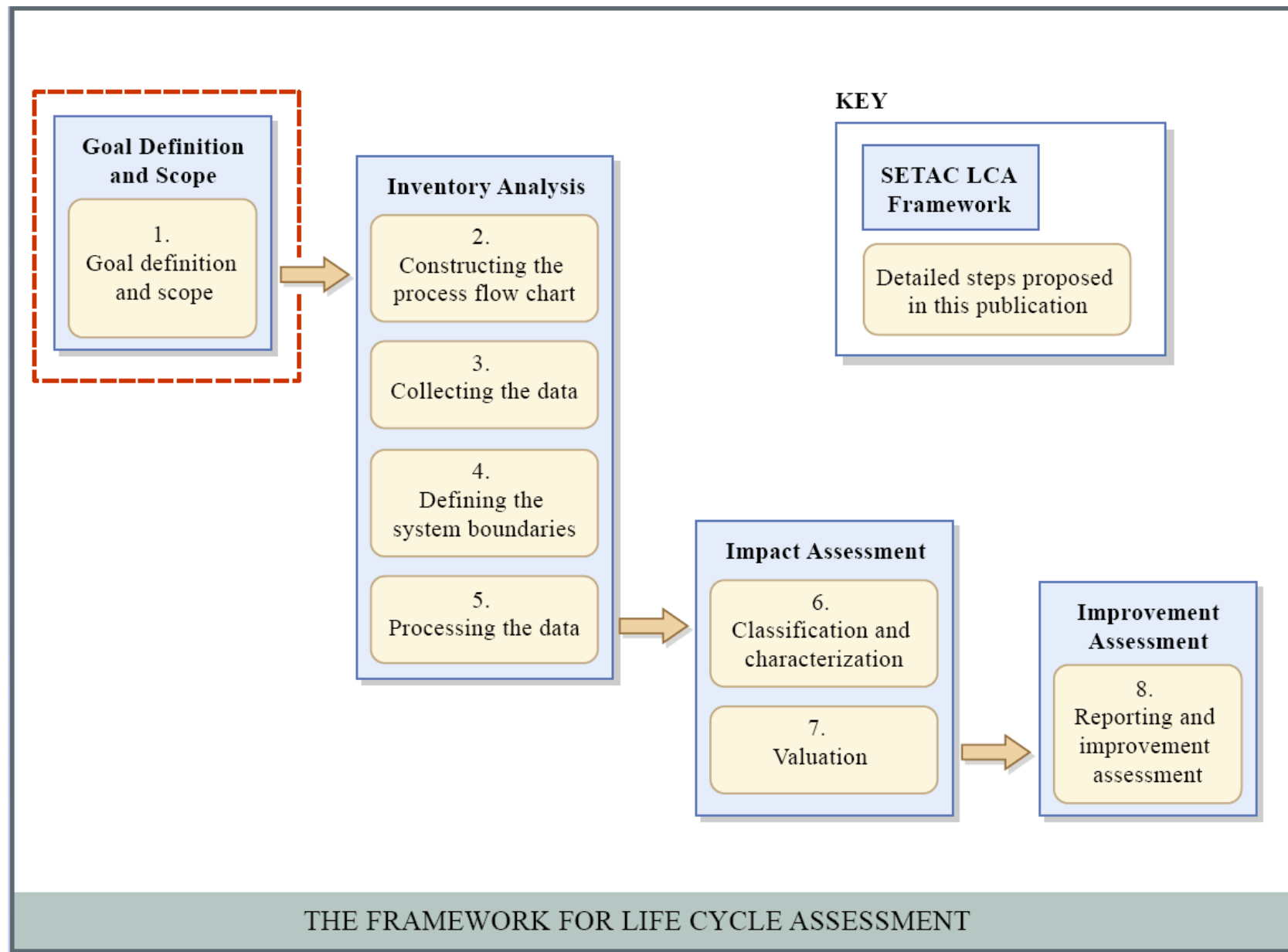
Un outil normalisé au niveau international

Si initialement les bases méthodologiques de l'ACV ont été posées à la SETAC³, l'ACV est aujourd'hui définie par les normes internationales ISO 14040 (1997) à 14043 (2000), qui spécifient le cadre, les principes généraux ainsi que les exigences pour la réalisation d'ACV, et la communication relative à ces études.

La norme ISO 14040 « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadres » décrit les caractéristiques essentielles de l'ACV et les bonnes pratiques de conduite d'une telle étude. Il s'agit d'une sorte de document « chapeau » dont la lecture est relativement aisée (les normes ISO 14041 à 14043 s'adressent plus aux experts réalisant l'ACV).

La norme 14040 étant la principale, les trois autres normes décrivent plus précisément chaque étape d'une ACV. La norme 14041 porte plus particulièrement sur la définition de l'objectif, du champ de l'étude et sur l'analyse de l'inventaire. La norme 14042 précise les principales caractéristiques de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie. La norme 14043 enfin, fournit des exigences et des recommandations pour mener l'interprétation du cycle de vie.

³ **SETAC** : Society of environmental toxicology and chemistry : Cette association, regroupant à la fois des universitaires et des industriels, a posé les bases de l'ACV et constitue encore aujourd'hui l'instance de référence pour de nouveaux développements (<http://www.setac.org/lca.html>) : c'est donc une sorte d'enceinte de réflexions R&D, en amont de la normalisation internationale ISO (<http://www.iso.org>)





1-Définition des objectifs du système

- Position du problème
- Définition des objectifs
- Champ de l' étude
 - Fonction du système
 - Unité fonctionnelle (UF) à laquelle les émissions et extractions seront rapportées
 - Limites du système
 - Définitions des scénarios de base et des alternatives à étudier



2 – Inventaire des émissions et extractions

- Quantification des émissions polluantes dans l'air, l'eau, et le sol ainsi que les extractions des matières premières renouvelables ou non renouvelables
- Utilisation des sols nécessaire pour la réalisation de la fonction du système



3- Analyse de l'impact environnemental

- **Classification** des émissions (quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux : effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité ...)
- **Caractérisation intermédiaire** : pondération des émissions à l'intérieur de chacune des catégories d'impact
- **Caractérisation des dommages**
(dommages sur la santé humaine, sur les équilibres climatiques ...)



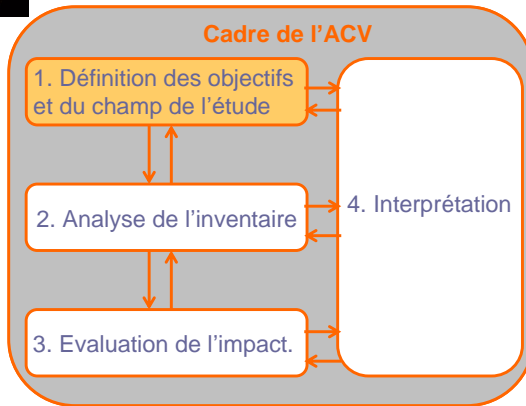
4 - Interprétation

- Interprétation des résultats dans chacune des phases
- Evaluation des incertitudes
- Options d'amélioration
- Mise en relation des aspects environnementaux, économiques et sociaux



Réalisation d'une ACV

- Approche itérative :
 - Evaluation préliminaire ou screening
 - Analyse détaillée
- Calcul « à la main »
- Utilisation de logiciels de calculs



Chap. 1- Définition des objectifs et du système

Goal and scope definition

Cette phase consiste à **décrire l'étude**, ses **objectifs** et son **champ d'application**.

Etape descriptive, souvent triviale

- Quel est le but de l'étude?
- Pour quelle application est-elle faite?
- Pour quel public?
- Quels sont les acteurs de l'ACV?




Définition des objectifs et du système

Objectif général	<ul style="list-style-type: none">- Information ou développement de produits,- Stratégie,- Politique générale,- Réglementation, ...
Public cible	<ul style="list-style-type: none">- Interne,- Consommateur,- Gouvernement, ...
Acteurs	<ul style="list-style-type: none">- Mandataire,- Exécutant de l' ACV,- Comité de direction,- Groupes de pression



Fonction du système : exemple

Produit	Fonction principale	Fonctions secondaires
<p>Paire de chaussures</p> 	<p>Protéger les pieds lorsqu'on marche</p>	<p>Protection intempéries, Protection froid, Esthétique, Odeur, Absorption chocs, ...</p>



Définir l'Unité fonctionnelle

- L'unité fonctionnelle (UF) est la grandeur quantifiant la fonction du système sur la base de laquelle les scénarios sont comparés.
=> Quel est le service offert?
- Tous les flux de l'inventaire sont rapportés à cette grandeur et sont calculés par unité fonctionnelle.
- C'est une grandeur quantifiable, additive définie relativement à la fonction et identique pour tous les scénarios.
- Exemple : Pomme de terre : Nourrir une famille de 4 personnes pendant 2 mois (repas du soir)



Déterminer les Flux de référence

- Pour une unité de fonctionnelle, on détermine les flux de référence: la quantité de produit nécessaire pour remplir cette fonction.

=> Qu'est ce qui est acheté?

- Les flux de référence :
 - sont spécifiques à chaque scénario
 - correspondent à ce qui est acheté pour assurer le service
- Ces flux de références serviront de base pour effectuer l'inventaire des émissions et extractions



Unité fonctionnelle et flux de références

- Unité fonctionnelle: unité commune représentant la fonction du système.
- Flux de référence: inputs de base pour obtenir 1 unité fonctionnelle, diffère entre scénarios.
- Paramètres clés: par exemple, durée de vie et nombre de réutilisations.



Reflexion ...

- Vous allez comparer deux types de chaussures d' un point de vue environnemental:
 - Une paire de chaussures de très bonne qualité
 - Une paire de chaussures standard
- Quels sont les paramètres clés pour la comparaison?
- Quelle est votre démarche?
- Quels sont vos problèmes?






Comparaison : exemple 1

Produits	Unité fonctionnelle = service offert	Flux de références = ce qui est acheté	Paramètres clés	Coûts
Scenario 1 (CHQ)	2 ans de protection des pieds (usage normal)	1 paire	- Quantité de matériaux de base	200 €
Scenario 2 (CHM)		4 paires	- Qualité de ces matériaux - Durée de vie	4 x 45 €





Comparaison : exemple 2

Produit ou système	Unité fonctionnelle	Flux de référence	Paramètres clé
<p>Peinture</p> 	<p>100 m² du mur peint pendant 20 ans</p>	<p>30 kg de peinture longue durée (20 ans)</p>	<p>Quantité appliquée au m²</p> <p>Durée de vie de la peinture</p>
		<p>2x25 kg peinture courte durée (10 ans, 2 applications)</p>	



L'unité fonctionnelle, un choix crucial



- **Ex: Mousse de polystyrène**
- Quels sont les problèmes environnementaux liés au polystyrène ?
- De quoi le polystyrène est-il composé ?
- Produit à partir de MP non renouvelables (pétrole)
- Non facilement biodégradable



Popcorn comme solution alternative

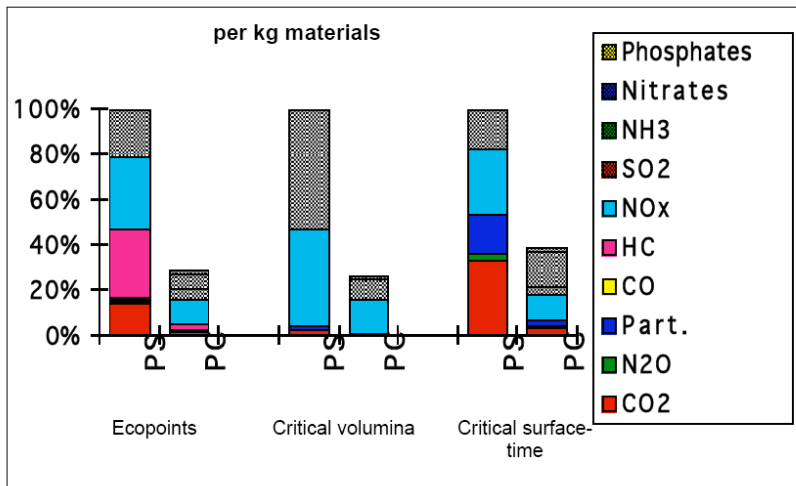
- Le popcorn est un produit naturel, 100% renouvelable et biodégradable.
- Production à partir de grains de maïs soufflés par air chaud.
- Question éthique ouverte: utilisation d'aliments comme MP industrielle
- Ce produit est-il environnementalement plus performant?



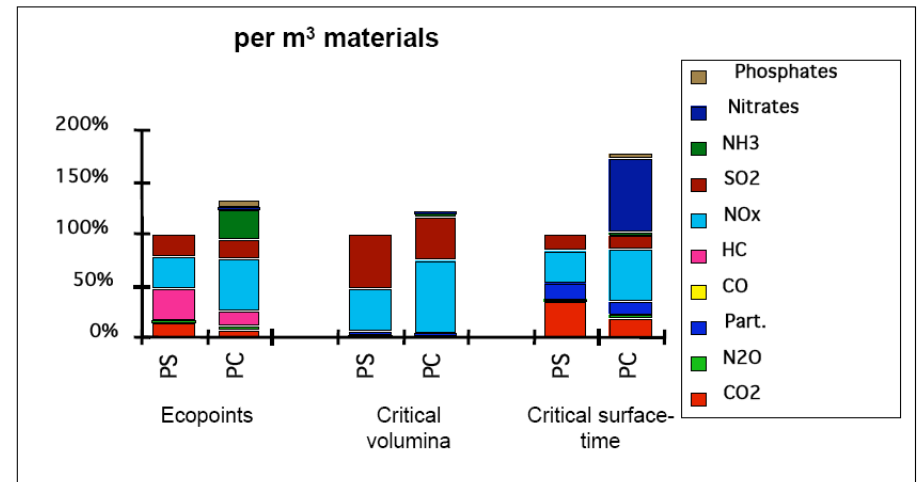


Comparaison impact global d'un remplissage de paquet par du popcorn (PC) et par du polystyrène (PS)

Popcorn <-> Polystyrène



Popcorn <-> polystyrène



Unité fonctionnelle : remplissage d'un volume de 1 m³ de carton d'emballage

Paramètre clé : densité du popcorn (4,6 x plus dense que chips en polystyrène)



Objectif : diminuer la densité du matériau biodégradable

Solution : Extraire l'amidon



Fonction et UF pour l'ex. des ampoules

Produits	Fonction principale	Fonctions secondaires et autres performances
Scénario 1	Eclairer	Qualité de la lumière, Ambiance, Temps d'allumage, ...
Scénario 2		

Produit ou système	Unité fonctionnelle = service offert	Flux de référence = acheté	Paramètres environnementaux clés
Scénario 1 Ampoules Incand. 	Avoir env. 600 lumens (intensité lumineuse) pendant 6000h	6 ampoules (1000h) (env. 210g) + 60W*6000h=360kWh	Lumen/Watt (utilisation) Lumen/gr.
Scénario 2 Ampoules Fluoresc. 		1 ampoule (6000h) (env. 160g) + 11W*6000h=66kWh	Type de mx Durée de vie

Analyse du cycle des coûts

360 kWh/UF . 0,1 €/kWh=36 €/UF
 6 . 1€ =6 €/UF
 Total : 42 €/UF

66 kWh/UF . 0,1 €/kWh=6,6 €/UF
 1. 10 € = 10 €/UF
 Total : 16,6 €/UF



Définition du système

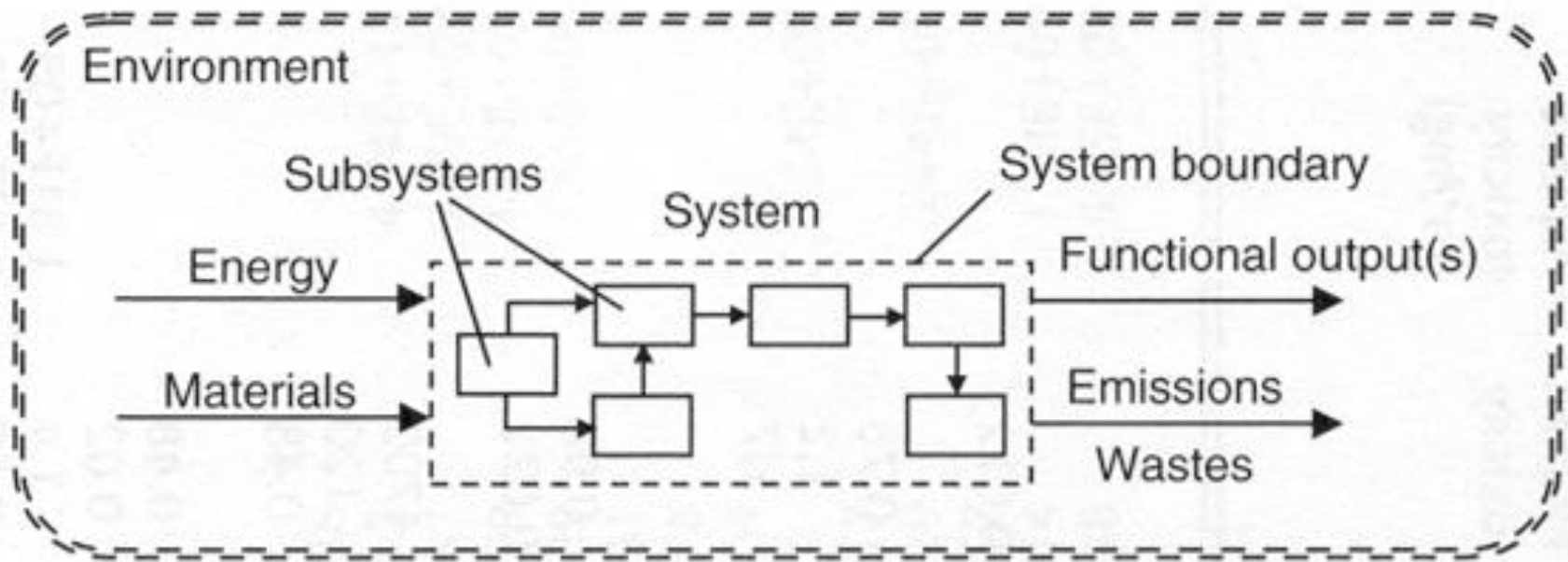
- **Système:** description de l'ensemble des processus (connectés entre eux par des flux et des produits intermédiaires) nécessaires à la réalisation d'une ou plusieurs fonctions.

=> Quelles sont les étapes du cycle de vie?

- **Niveau de détail** dans la modélisation du système : choisi en fonction des objectifs de l'étude.



Definition du système, des limites du système et de l'environnement

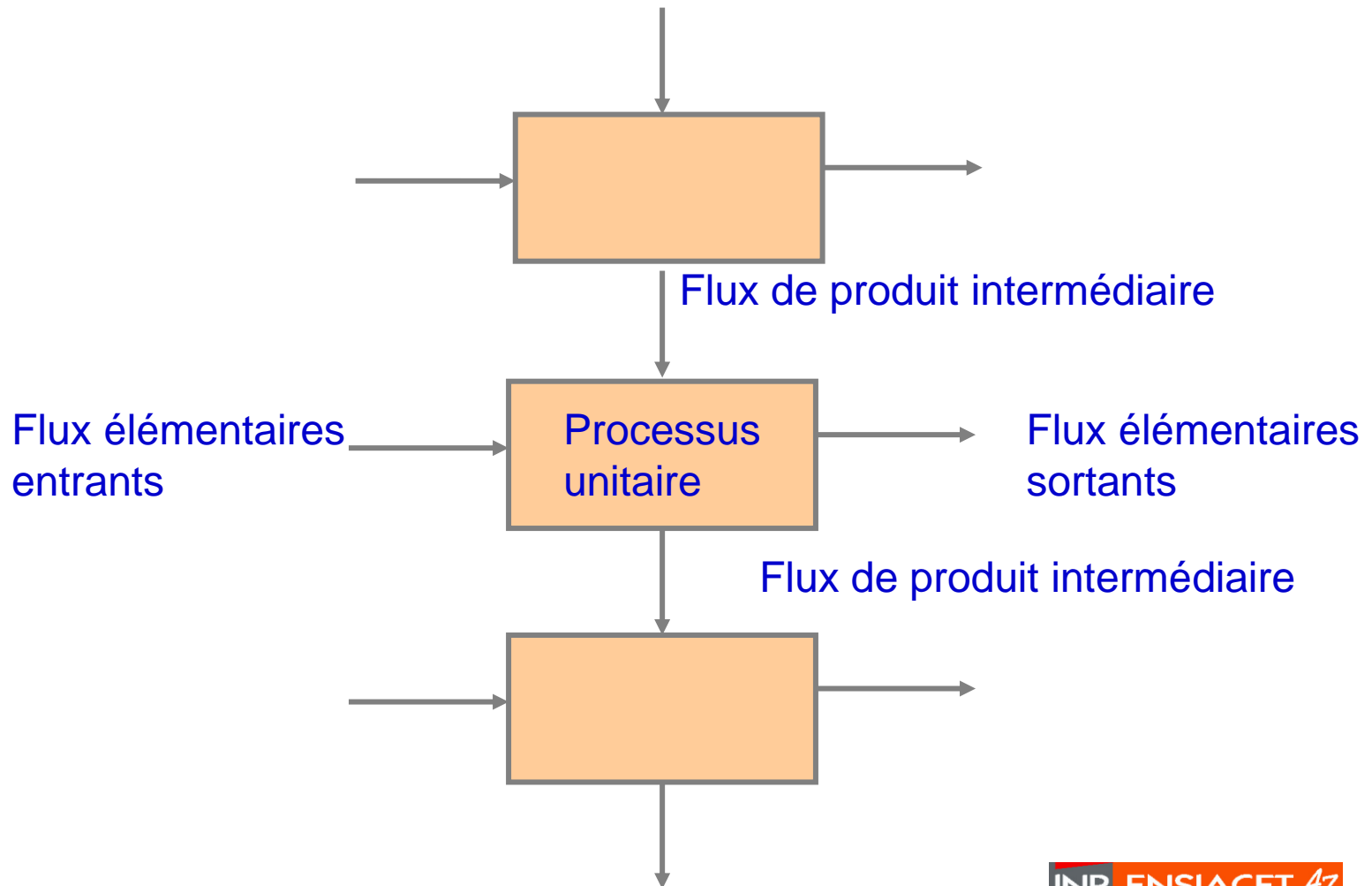


A system is defined as a collection of materially and energetically connected operations (including, e.g., manufacturing process, transport or fuel extraction) which performs some defined function.

The system is 'separated' from the environment by a system boundary

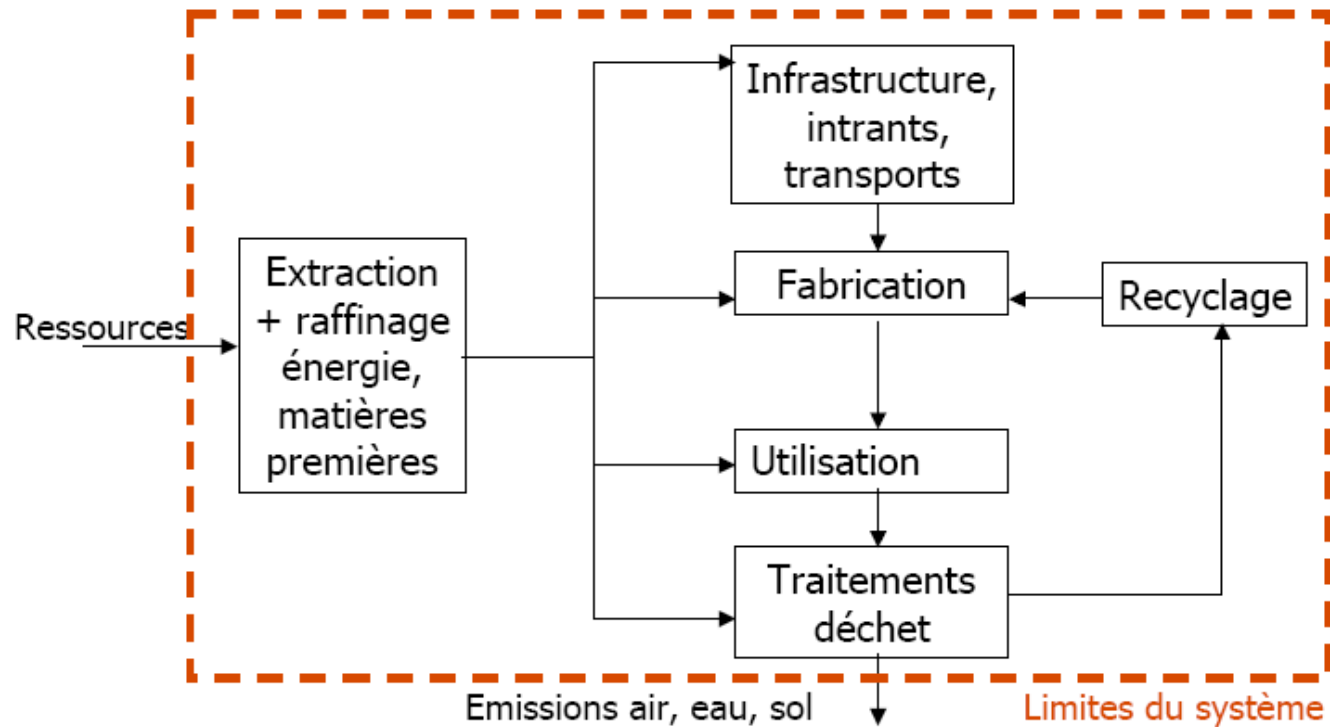


Exemple d'un ensemble de processus unitaires dans un système (d'après ISO 14041)





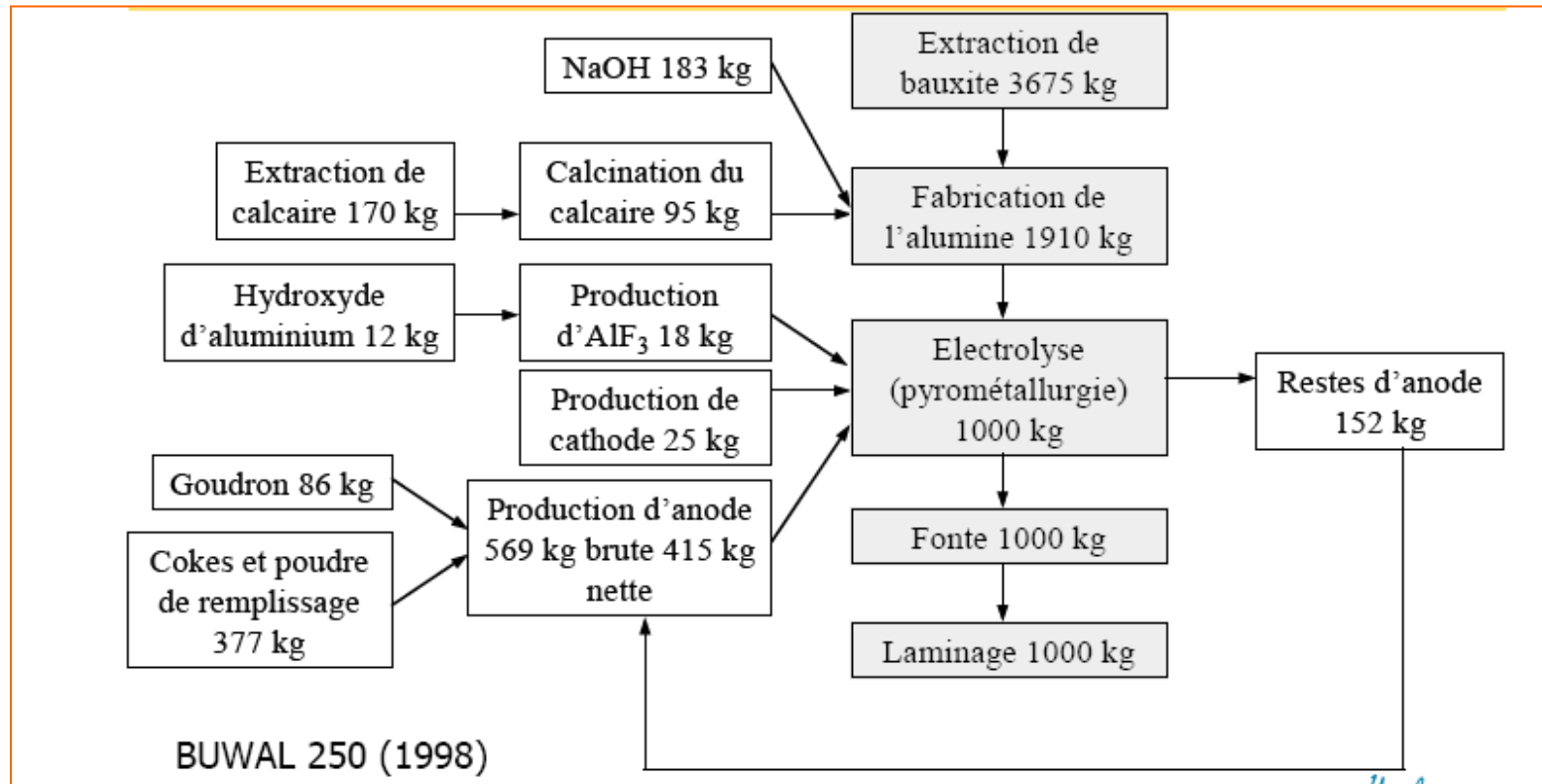
Arbre des procédés et principales étapes



Le traitement des déchets fait partie du système de production !



Arbre des processus

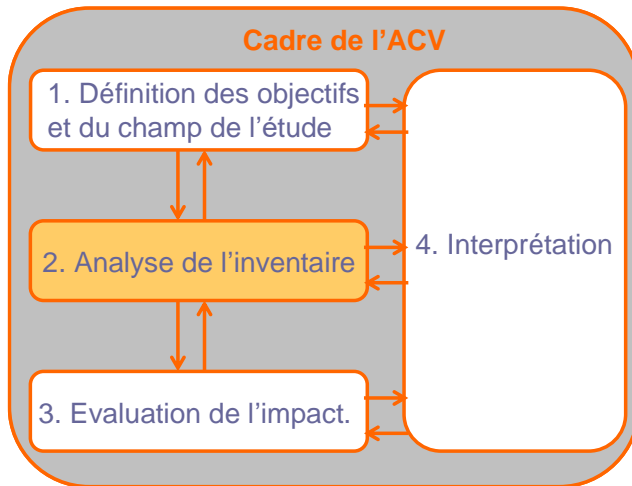


Arbre des processus de la fabrication d' aluminium primaire



Limites du système: règles de cohérence

- Règle 1 : Les limites du système doivent recouvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios (pas de limites géographiques).
- Règle 2 : Seuls les processus qui contribuent à plus de x % des émissions, de la masse ou de l' énergie.
- Règle 3 : Les étapes identiques dans les deux scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de références affectés par ces processus soient strictement égaux (output totaux du système également identiques).
- Estimation rapide de ces processus intéressante pour étudier la contribution relative des étapes de production



Chap. 2- **Inventaire des émissions** ***Inventory analysis***

- Identifier et quantifier les fardeaux environnementaux au cours du cycle de vie de l'activité étudiée



Définitions

1. Inventaire des flux élémentaires ou inventaire des extractions et des émissions = description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants qui traversent les limites du système.
2. Il regroupe :
 1. les quantités de substances polluantes émises
 - +
 2. les ressources extraites (minerais, vecteurs énergétiques, surfaces de sol)

au cours du cycle de vie du produit ou du service



Définitions : inventaire

- Se calcule en multipliant l'inventaire de production par des facteurs d'émissions ou d'extraction.
- Récapitule les flux de référence et les flux intermédiaires correspondant aux processus unitaires du système.
- Regroupe l'ensemble des intrants (quantités de matière et d'énergie consommées) pour le produit ou le service lors des différentes phases du cycle de vie.
- Facteurs d'émissions et d'extraction, issus de bases de données donnent la quantité de chaque substance émise ou extraite par unité d'intrant utilisé.
- Flux élémentaires parfois calculés directement à partir du bilan de masse du processus.



Données d'inventaire de base

Où trouve-t-on les données d'inventaire de base?

- ✓ Bases de données d'inventaire de cycle de vie, disponibles pour les matières premières courantes, l'énergie, les transports
- ✓ Bases de données publiques ou publiées.
- ✓ Groupements ou fédérations professionnelles

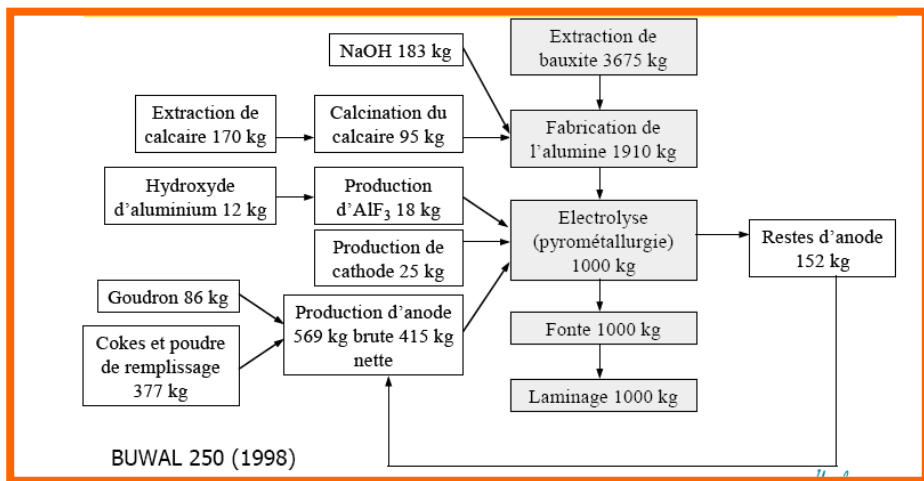
Exemple : Base de données Eco-invent



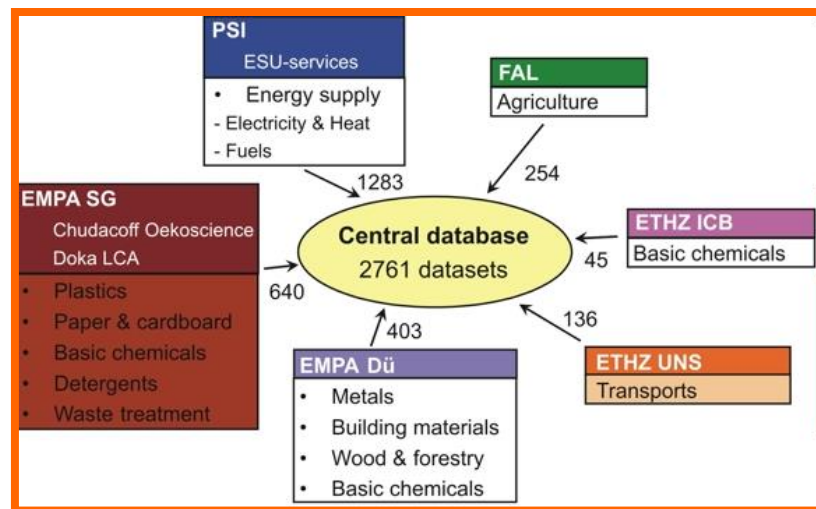
Inventaire

Utilisation de bases de données internationales

Arbre des processus ACV



**Swiss Centre
for Life Cycle
Inventories**
A joint initiative
of the ETH domain
and Swiss Federal
Offices





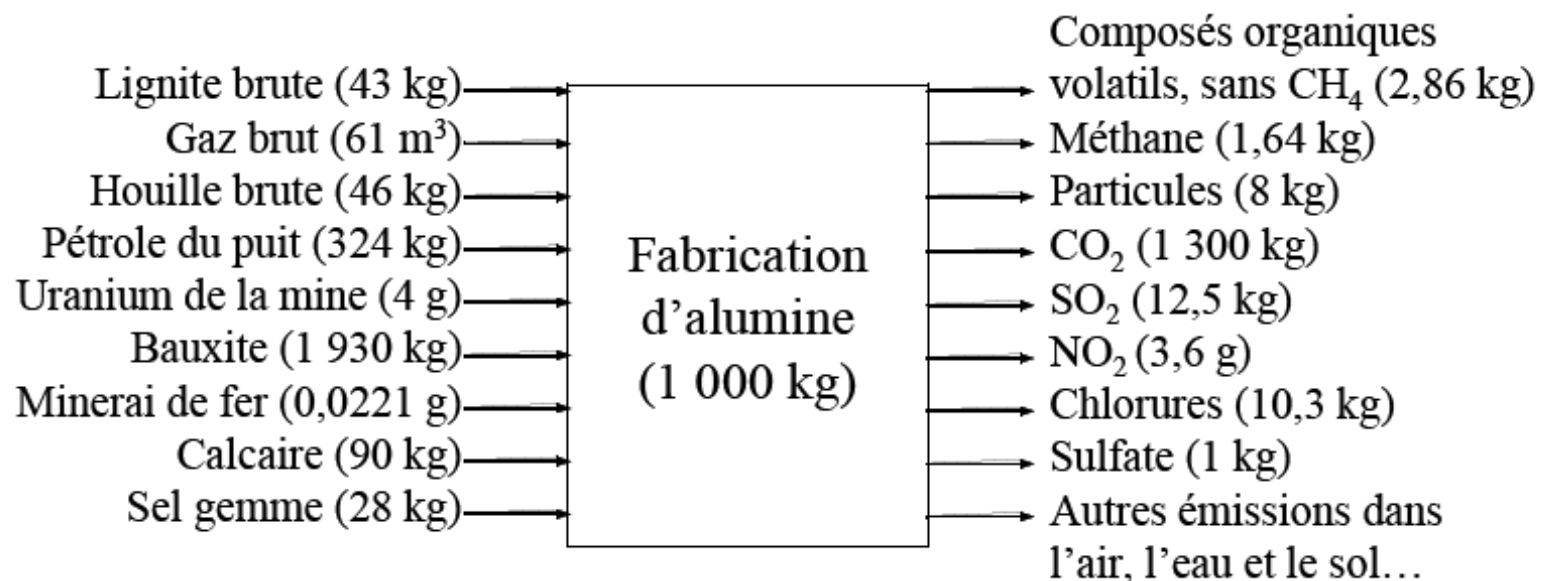
Marche à suivre pour l'élaboration de l'inventaire

- **Réalisation de l'arbre des processus** : à partir des flux de référence définis en relation avec l'unité fonctionnelle, il regroupe l'ensemble des modules unitaires de base constitutifs du système
- **Inventaire de production** : Pour chaque processus unitaire de base, ses intrants (les flux intermédiaires du système) et ses émissions directes (les flux élémentaires) sont déterminés
- **Recherche des données d'émissions et d'extractions liées à ces intrants (bases de données)** : Les émissions et extractions indirectes sont calculées en multipliant la quantité d'intrant utilisée par unité fonctionnelle avec ces facteurs d'émission par unité d'intrant.
- **Calcul des émissions et extractions totales**, en sommant les flux élémentaires directs et les émissions et extractions indirectes liées aux intrants



Exemple : Inventaire des extractions et émissions pour la fabrication d'alumine

Fabrication d'alumine, OFEFP 250





Calcul de l'inventaire des extractions et émissions

- Souvent utile de calculer à la main les résultats pour les bilans d'énergie et de CO₂, afin de contrôler les ordres de grandeur.
- Extension de la démarche à l'ensemble des émissions et extractions.
- Pour la totalité des substances à prendre en compte, utilisation d'un logiciel d'ACV. (voir annexe)



Energies

Energie
primaire (non
renouvelable)



= y compris
extraction
et préparation

Energie
finale



= achetée

Energie
utile



= utilisée

Energies renouvelables: capteurs solaires thermiques, photovoltaïques, énergie éolienne, hydraulique renouvelables mais impliquent la consommation d'énergie primaire non renouvelable pour la fabrication et l'exploitation de leur infrastructure



Energie primaire non renouvelable et émissions de CO₂ pour différents matériaux et modes de transport sur tout le cycle de vie (source : base de données Eco-invent)

Energie	Energie primaire MJ	CO ₂ kg
1 kWh électricité (Europe)	10,5	0,45
1 kWh électricité (CH-Suisse)	7,3	0,11
1 l essence (sans combustion)	43,2	0,49
1 l essence (avec combustion)	43,2	2,81
1 kg fioul léger (42,7 MJ final)	56,9	3,71
Transport		
1 000 km kg transport camion 40 t	2,8	0,16
1 pers · km train (ICE allemand)	1,1	0,06
1 pers · km voiture	3,2	0,18
Matériau		
1 kg acier, faiblement allié	24,7	1,26
1 kg aluminium primaire	162	9,52
1 kg aluminium recyclé	21,8	1,22
1 m ³ béton	1320	255
1 kg cuivre	26,8	1,52
1 m ³ eau	6,3	0,32
1 kg papier d'emballage blanchi	31,2	1,58
1 kg polyéthylène HDPE	79,9	1,75
1 kg verre	11,7	0,62



Inventaire : bilan énergétique et bilan de CO₂

- Lors de la conception d'un produit, le calcul de la **demande en énergie primaire** non renouvelable par UF constitue un outil utile et efficace pour une première identification des points responsables de la majorité des émissions et des extractions de ressources.
- **Bilan CO₂** : principe id. au bilan énergétique



Bilan énergétique à la main



Phase	Quantité par UF [Unité par UF]	Energie par unité [MJ/Unité]	Energie par UF [MJ/UF]
Matériaux			
Fabrication			
Utilisation			
Transport			
Emballage			
Traitement déchets			
Total			



Bilan énergétique

Phase	Quantité par UF [Unité par UF]	Energie par unité [MJ/Unité]	Energie par UF [MJ/UF]
Matériaux	Verre : 0.12 kg/UF	11.7 MJ/kg verre	1.4 MJ/UF
	Cuivre : 0.09 kg/UF	26.8 MJ/kg cuivre	2.4 MJ/UF
Fabrication	6 ampoules / UF	0.35 MJ/ampoules	2.1 MJ/UF
Utilisation	360 kWh/UF	7.3 MJ/kWh (électricité CH)	2628 MJ/UF
Emballage	0.06 kg papier/UF	31.2 MJ/kg papier	1.9 MJ/UF
Transport	270 km kg/UF	2.8/1000 MJ/(km kg)	0.8 MJ/UF
Total	-	-	2636.6

Energie primaire non renouvelable pour un service de 6000 lumens pendant 6000 h



Bilan énergétique

Phase	Quantité par UF [Unité par UF]	Energie par unité [MJ/Unité]	Energie par UF [MJ/UF]
Matériaux	Verre : 0.1 kg/UF	11.7 MJ/kg verre	1.2 MJ/UF
	Electronique : 0.06 kg/UF	199 MJ/kg élec.	11.9 MJ/UF
Fabrication	1 ampoule / UF	10.6 MJ/ampoules	10.6 MJ/UF
Utilisation	66 kWh/UF	7.3 MJ/kWh (électricité CH)	482 MJ/UF
Emballage	Papier : 0.04 kg/UF	31.2 MJ/kg papier	1.2 MJ/UF
Transport	200 km kg/UF	2.8/1000 MJ/(km kg)	0.6 MJ/UF
Total	-	-	507.5 MJ/UF



Emissions de CO₂



Phase	Quantité par UF [Unité par UF]	Emissions par unité [kgCO2/Unité]	Emissions par UF [kgCO2/UF]
Materiaux Verre Cuivre	Comme énergie		
Fabrication			
Utilisation			
Transport			
Emballage			
Traitement déchets			
Total			



Emissions de CO₂

Phase	Quantité par UF [Unité par UF]	Emissions par unité [kgCO ₂ /unité]	Emissions par UF [kg _{CO2} /UF]
Materiaux			
Verre	0.12 [kg/UF]	0.62 [kg _{CO2} /kg]	0.07
Cuivre	0.09 [kg/UF]	1.52 [kg _{CO2} /kg]	0.14
Fabrication	2.2 [MJ _{prim} /UF] (6 x 0.35 MJ _{prim} /amp)	2 [kg _{CO2} / 1000 MJ _{prim}]	0.0042
Utilisation	360 [kWh _{fin} /UF]	0.11 [kg _{CO2} / kWh]	39.6
Transport	270 [kg·km/UF]	0.16 [kg _{CO2} / 1000kg·km]	0.043
Emballage	0.06 [kg/UF]	1.58 [kg _{CO2} /kg]	0.09
Total			39.9



Qualité des données: Informations disponibles dans EcolInvent

- Portée géographique et temporelle des données, cad région et période pour lesquelles les données sont valables.
- Les limites du système («berceau à la tombe» ou «berceau aux portes de l'usine») couvertes par les données.
- La forme des données (agrégées ou non, moyennées)
- La qualité et les lacunes des données ainsi que des indications sur d' éventuelles données (comparaison avec d'autres sources de données, bilan de masse ...)
- Les intrants de l' environnement et sortants vers l' environnement considérées
- Les sources considérées (littérature ou site de production)



Incertitudes et propagation

- Incertitude sur les paramètres
- Incertitude du modèle (ex. analyse impact, hypothèse de linéarité des processus environnementaux)
- Incertitude liée aux hypothèses et aux choix (UF, allocation)
- Variabilité spatiale
- Variabilité temporelle (évolution des technologies, des performances et de leurs impacts)
- Variabilité technologique



Coproduits et allocations

- Un grand nombre de processus de production agricole et industrielle et de traitement des déchets : systèmes à produits multiples.
- Dans une ACV, on ne s'intéresse généralement qu'à un seul de ces produits. ,
- D' où la nécessité d' allouer ou *d'affecter* certaines charges environnementales et l'utilisation de certaines matières premières entre le produit étudié et les autres coproduits



Cas des coproduits

- Quelles émissions sont à attribuer respectivement au produit A et au produit B, dans quelle proportion et suivant quels critères?
- De façon plus générale, résoudre ce problème revient à répondre aux questions suivantes:
 - Quelle activité économique est responsable de quel problème environnemental ?
 - Ou formulé inversement: quel problème environnemental est dû à quelle activité économique?



Méthodes d' allocation pour coproduits

- Eviter ces problèmes en modifiant les objectifs de l' étude et en étudiant simultanément la production des différents coproduits -> élargir les frontières du système pour inclure tous les produits
- Mais, l' ACV s' intéresse généralement à un seul produit!
- D' où la nécessité de se ramener à un système équivalent à produit unique



Principales règles d'allocation

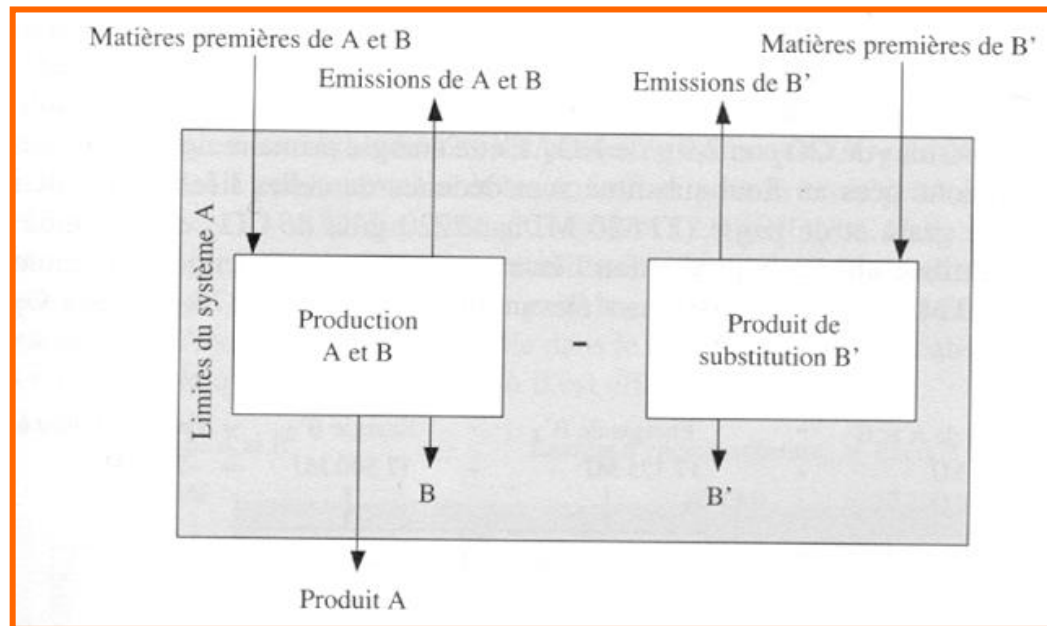
- De préférence, éviter l'allocation en procédant
 - Par séparation des processus s'il est possible de dissocier les systèmes de production ou
 - Par extension du système, lorsque le produit substitué est connu de façon certaine
- Si ce n'est pas possible:
 - Allocation physique (par exemple, par masse) applicable si existence d'un lien de causalité
 - Variations marginales applicables s'il est possible de faire varier légèrement la proportion d'un produit et de son coproduit
 - Sinon procéder par allocation financière



Subdivision des processus

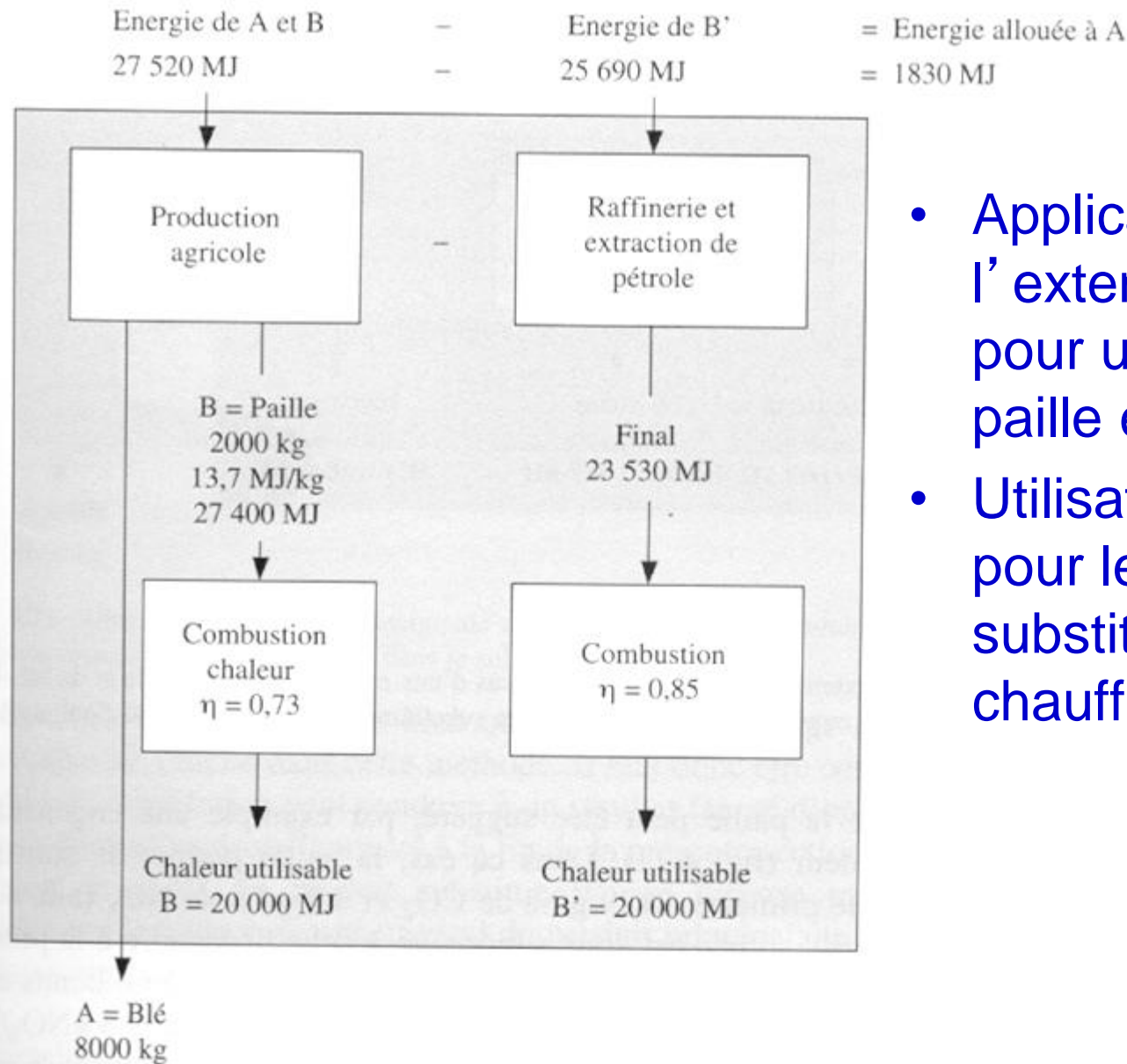
Examiner si certains sous-processus sont spécifiques à l'un des sous-produits.

Extension du système ou bonus



En plus du produit A, le coproduit B substitue un produit similaire B' susceptible d'être fabriqué par d'autres processus.

->émissions et extractions liées au produit substitué sont évitées.



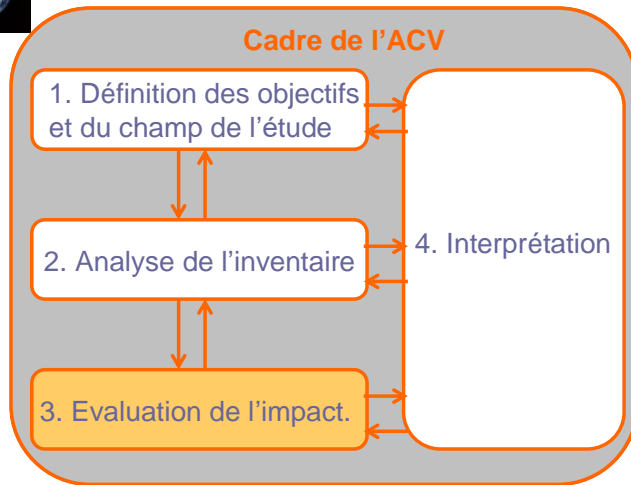
- Application de l'extension du système pour une coproduction de paille et de blé
- Utilisation de la paille pour le chauffage en substitution à un chauffage au fioul



Allocations physique/financière

Variations marginales

- Allocation physique, fondée sur un paramètre physique (masse, contenu énergétique, volume ou le nombre de moles): répartir les impacts entre les produits suivant le paramètre choisi. Chaque impact est alors alloué de la même façon.
- Allocation financière: répartir les impacts entre les différents produits sur la base d'une causalité économique: prix de marché du produit ou coût de production ...Chacun des impacts du cycle de vie est alors alloué de la même façon.
- Variations marginales : s'applique si on peut faire varier la proportion entre coproduits. On détermine alors les émissions, les consommations d'énergie et d'extraction de matières premières engendrées ainsi que les émissions dans la situation de base et dans le cas d'une légère variation des quantités produites -> en déduire l'émission allouée à chaque sous-produit



Chap. 3- Analyse de l'impact environnemental *Impact assessment*

- Comment interpréter les données d'inventaire?
- Comment relier ces valeurs avec leur impact sur l'environnement?

Initiative pour le Cycle de Vie de la SETAC et du Programme des Nations Unies pour l'environnement



Principes de l'analyse de l'impact



=
?



Comment comparer une émission de plomb dans l'eau
à une émission de CFC dans l'air?

Comment comparer toxicité humaine et effet de serre?



Problématique

- Lors de l'inventaire, réalisation d'une première agrégation en sommant toutes les émissions de la même substance ainsi que les diverses extractions de la même ressource.
- Table d'inventaire : la plupart du temps, un scénario est préférable pour un certain nombre de substances mais défavorable pour d'autres.
- Nécessité d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts générés par chaque substance.



méthodes permettant d'agréger les émissions en fonction de leur(s) potentiel(s) à causer un ou plusieurs impacts environnementaux.



Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie

Résultats d'inventaire

CATEGORIES INTERMEDIAIRES

CATEGORIES DE DOMMAGES

Toxicité humaine

Accidents

Bruits

Création d'oxydants

Destruction d'ozone

Changement climatique

Acidification

Eutrophisation

Ecotoxicité

Utilisation du territoire et perte d'habitat

Dispersion des espèces et organismes

Ressources naturelles

- Minerais
- Energie
- Eau
- Sol (érosion, salinité)
- Utilisation des ressources

Ressources biotiques

Santé humaine

Environnement
biotique naturel

Ressources
naturelles biotiques

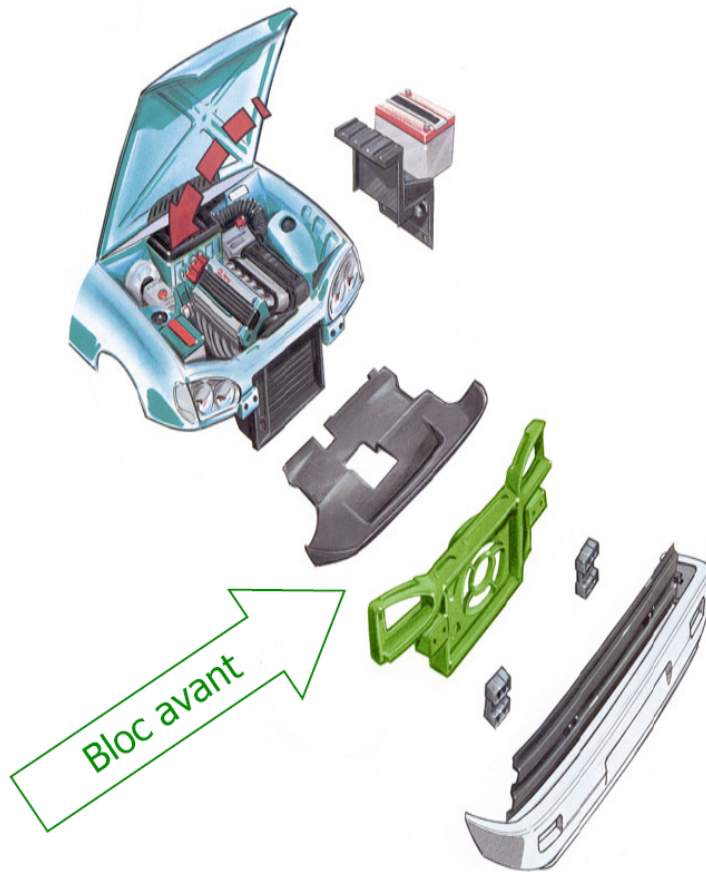
Environnement anthropique
abiotique et biotique

Environnement
naturel biotique

Informations
incertaines



Le cas du bloc avant



Fonction: transport sur toute la durée de vie de la voiture (200'000 km).

Unité fonctionnelle : 1 composant de rigidité équivalente pour un service de 200'000 km.

Limites du système: ensemble du cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination des déchets, en tenant compte de la fabrication et de l'utilisation.



Comment interpréter l'inventaire?

Flux de
référence

Substance	Unité	Bloc acier	Composite SMC	Aluminium
Poids final	kg	10 kg	7 kg	3.8 kg
Matières poids bruts	kg	15.4	7	5.9
Fabrication				
Electricité	kWh	19.7	4.7	15.2
fuel	kg	2.3	0.56	1.8
Utilisation				
essence		80	56	30.4
Recyclage				
taux	%	0%	0%	0%

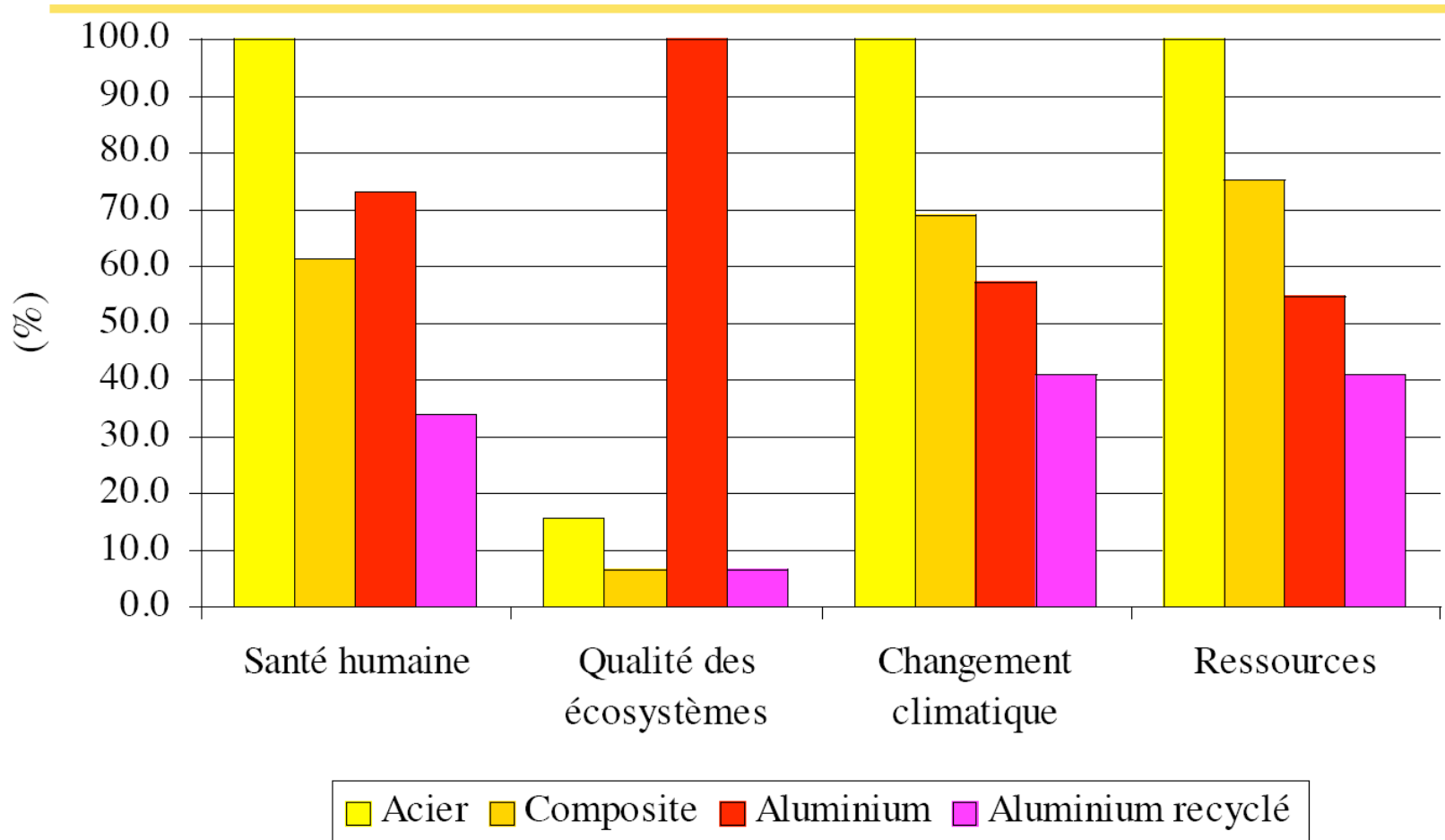
Bases de données

Inventaire

Substance	Unité	Bloc acier	Bloc composite	Bloc alu
Poids	kg	10 kg	7 kg	3.8 kg
Ressources				
Energie	MJ	4287	2865	2686
Air				
CH4	kg	0.48	0.33	0.29
CO2	kg	317	222	179
CO	kg	2.6	1.6	0.9
COV	kg	0.81	0.91	0.38
NOx	kg	0.32	0.52	0.23
SO2	kg	0.063	0.173	0.35
Cd	kg	4.0E-6	4.6E-6	4.9E-6
Ni	kg	9.6E-5		
Eau				
Ni	kg	1.3E-4		
Nitrate	kg	1.9E-4	5.3E-4	8.2E-4



Dommmages





Les étapes de l'analyse d'impact

- **Caractérisation intermédiaire**

- Les émissions et extractions sont pondérées au sein de chaque catégorie intermédiaire auxquelles elles contribuent;

- **Facteur de caractérisation intermédiaire**

Les masses émises ou extraites sont multipliées par ces facteurs puis sommées dans chaque catégorie intermédiaire

-> Score d'impact intermédiaire (exprimé en kg eq. d'une substance de référence)



Score d'impact intermédiaire

- SI_i score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i ,
- $FI_{s,i}$ facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i ,
- M_s masse émise ou extraite de la substance s .
- Par exemple, toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , méthane, HFC, CFC. ..) peuvent ainsi être ramenées à une émission équivalente de CO_2 .

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



Principe de calcul d'un impact environnemental

➔ « Quantification » basée sur des indicateurs d'impacts

➤ Pour 1 type d'impact ➔ Correspondances entre différents polluants sur la base d'une unité commune

Somme pondérée

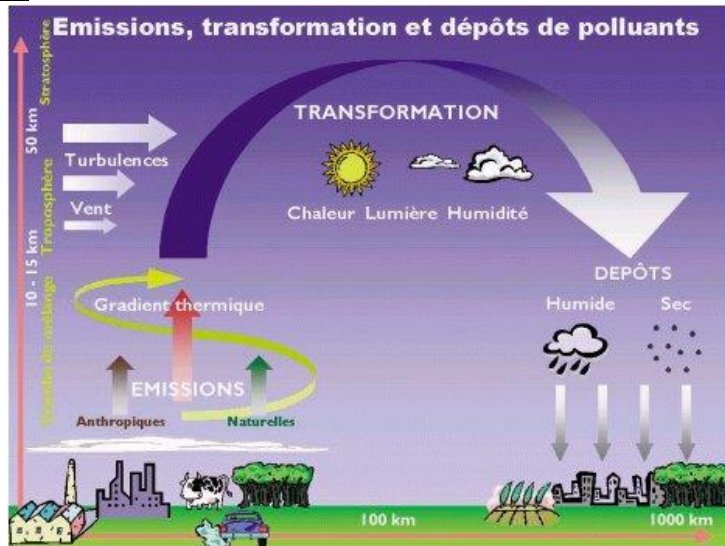
$$I = \sum_{i=1}^n m_i \times f_i$$

Quantité de la substance i

Facteur d'impact de la substance i
(adimensionnel)



Acidification



Eutrophisation

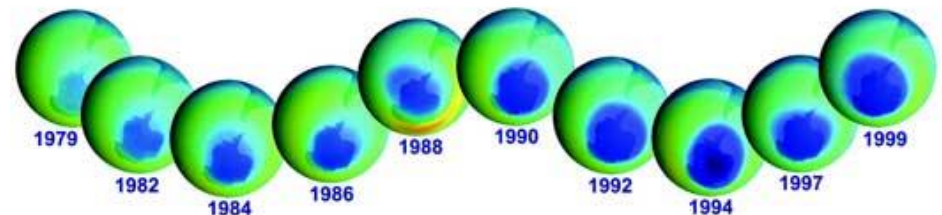
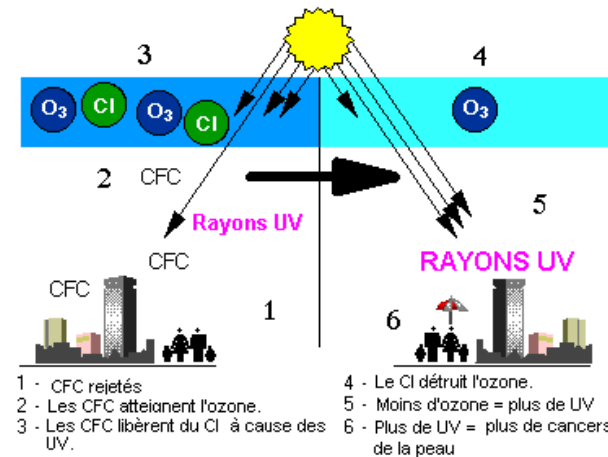


Photochimie (ozone), smog



Appauvrissement couche ozone

Processus d'appauvrissement de l'ozone





Effet de serre



➡ **Phénomène naturel et indispensable**



Caractérisation

Caractérisation de l'effet de serre

$$GWP_i = \frac{\int_0^n a_i C_i dt}{\int_0^n a_{CO_2} C_{CO_2} dt}$$

- Mesure du forçage radiatif* (quantité d'infrarouge qu'une substance peut absorber, a_i en Wm^{-2}) induit par une molécule, C_i concentration dans l'atmosphère ppm)
- Intégration du forçage radiatif sur une période donnée, n en général 100 ans : prise en compte de la dégradation de la substance

	Durée de vie (ans)	Global Warming Potential		
		20 ans	100 ans	500 ans
CO ₂	12	1	1	1
CH ₄	50-200	56	21	6,5
N ₂ O	120	280	310	170

*différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise



Effet de serre

Contribution du CH₄

- Produit de tous temps
- Produit principalement par décomposition bactérienne de la matière organique, dans des conditions anaérobies
- Mais aussi lors des feux de végétation, des dégazages et des fuites lors de l'exploitation ou la distribution du gaz naturel

Depuis début de l'ère industrielle : **+ 125%**

Sources actuelles :

pour la moitié : activités humaines, principalement agricoles



$$C_{\text{CH}_4} \approx \frac{C_{\text{CO}_2}}{100}$$

MAIS CH₄ absorbe **20 fois +** de rayonnements



Global Warming

Substance

Potency Factor PF

Total

Carbon dioxide

1

Carbon monoxide

3

Carbon tetrachloride

1400

Chlorodifluoromethane, R22

1700

Chloroform

4

Chloropentafluoroethane, R115

9300

Dichlorodifluoromethane, R12

8500

Dichlorotetrafluoroethane, R114

9300

Difluoroethane

140

Hexafluoroethane

9200

Methane

21

Methylene chloride

9

Nitrous oxide

310

Nitrogen oxides (Nox)

40

Pentafluoroethane, R125

2800

Perfluoromethane

6500

Tetrafluoroethane

1300

Trichloroethane (1,1,1)

110

Trichlorofluoromethane, R11

4000

Trichlorofluoroethane, R113

5000

Trifluoroethane, R143a

3800

Trifluoromethane, R23

11700

Volatile Organic Compounds

11



Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie

Résultats d'inventaire

CATEGORIES INTERMEDIAIRES

CATEGORIES DE DOMMAGES

Toxicité humaine

Accidents

Bruits

Création d'oxydants

Destruction d'ozone

Changement climatique

Acidification

Eutrophisation

Ecotoxicité

Utilisation du territoire et perte d'habitat

Dispersion des espèces et organismes

Ressources naturelles

- Minerais
- Energie
- Eau
- Sol (érosion, salinité)
- Utilisation des ressources

Ressources biotiques

Santé humaine

Environnement
biotique naturel

Ressources
naturelles biotiques

Environnement anthropique
abiotique et biotique

Environnement
naturel biotique

Informations
incertaines

Calcul des scores

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

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \cdot SI_i$$



Etapes optionnelles

- **Normalisation:** résultats rapportés à des valeurs de référence

Score normalisé

$$N_c = \frac{S_c}{VN_c}$$

Score de la catégorie d'impact c

valeur de normalisation

- **Regroupement:** tri ou attribution de rangs, échelle nominale ou spatiale (globale, régionale, locale)

Choix de valeurs qui reflètent l'importance
Donnée par la société à telle ou telle catégorie

- **Pondération:** agrégation finale

IE pondéré total

Facteur pondération pour c

$$IP = \sum_c FP_c \cdot N_c$$

Indicateur unique!

Incorporation de valeurs sociales, politiques, éthiques ->élément débattu de l'ACV



Normalisation

- Compare la contribution respective du produit ou du service considéré à l'effet total actuel au niveau mondial, continental ou régional pour une catégorie donnée (catégorie intermédiaire ou dommages).

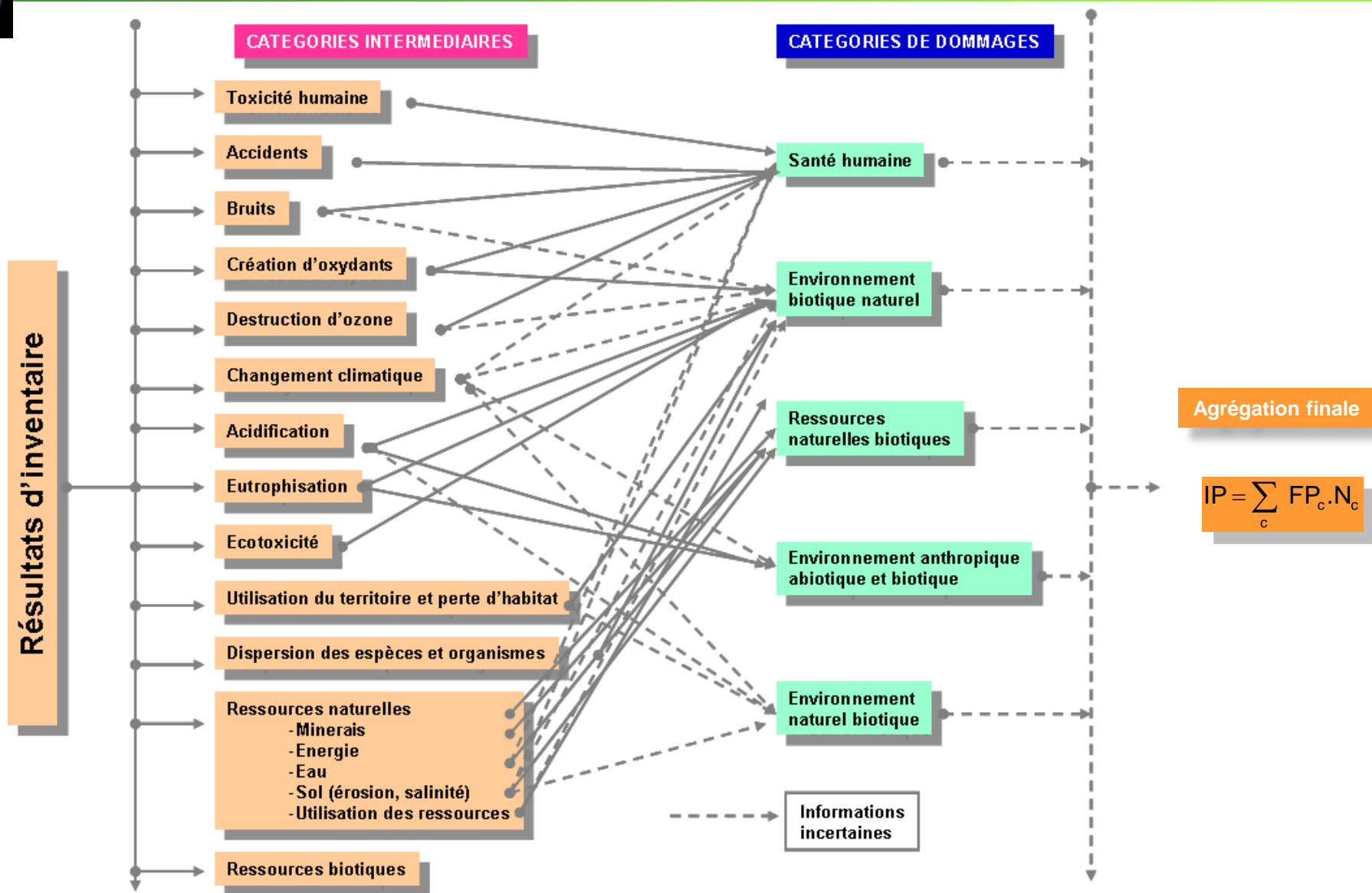
Score normalisé

$$N_c = \frac{S_c}{V N_c}$$

Score de la catégorie d'impact c

valeur de normalisation =

À partir des émissions mondiales, continentales ou nationales multipliées par leur facteur de caractérisation ou de dommages respectifs



Calcul des scores

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

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \cdot SI_i$$



Principales méthodes d'analyse d'impact

- **Impact 2002+ : niveau intermédiaire + dommages**



Volume critique

- Calcul pour chaque polluant de l'air ou de l'eau du volume équivalent pollué jusqu'à une valeur limite
- $C_{i,m}$ issues de l'Ordonnance de la pollution de l'air et de l'Ordonnance fédérale sur le déversement des eaux usées.
- Résultats données en m^3 d'air critique, m^3 d'eau critique, m^3 de déchets solides
- Méthode simple mais critiquable: pas de prise en compte de la persistance et devenir (dégradation, dilution) des polluants, surestimation de l'effet des polluants à faible durée de vie.



Exemple de méthode : IMPACT 2002+

Résultats d'inventaire

CATEGORIES INTERMEDIAIRES

CATEGORIES DE DOMMAGES

Toxicité humaine

Effets respiratoires

Radiation ionisante

Destruction couche ozone

Formation photo-oxydants

Acidification aquatique

Eutrophisation aquatique

Acid/eutroph. terrestre

Ecotoxicité terrestre

Ecotoxicité aquatique

Occupation des sols

Changement climatique

Energie non renouvelable

Extraction de minerais

Santé humaine

Qualité des écosystèmes

Changement climatique

Ressources

Informations
incertaines

Joliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J.,
Rebitzer G., Rosenbaum R., 2003,
*Impact 2002+ : a new life cycle impact assessment
methodology*,
Int. J. LCA (6), pp. 324-330



Facteurs de caractérisation intermédiaires IMPACT 2002+

Catégorie intermédiaire	Substance de référence intermédiaire	Catégorie de dommages	Unité de dommage
Toxicité humaine (cancérigène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l'air	Santé humaine	DALYs/unité émise
Toxicité humaine (non cancérogène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l'air	Santé humaine	
Effets respiratoires	kg PM _{2.5} éq. dans l'air	Santé humaine	
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq. dans l'air	Santé humaine	
Radiations ionisantes	Bq Carbone-14 éq. dans l'air	Santé humaine	
Formation de photo-oxydants	kg éthylène éq. dans l'air	Santé humaine	PDF·m ² ·an/unité émise
		Qualité de l'écosystème	
Ecotoxicité aquatique	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau	Qualité de l'écosystème	
Ecotoxicité terrestre	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau	Qualité de l'écosystème	
Acidification/ Eutrophisation terrestre	kg SO ₂ éq. dans l'air	Qualité de l'écosystème	
Acidification aquatique	kg SO ₂ éq. dans l'air	Qualité de l'écosystème	En développement
Eutrophisation aquatique	kg PO ₄ ³⁻ éq. dans l'eau	Qualité de l'écosystème	En développement
Occupation des sols	m ² terre éq.	Qualité de l'écosystème	PDF·m ² ·an/unité émise
Changement climatique	kg CO ₂ éq. dans l'air	Changement climatique	kg CO ₂ éq. dans l'air
Extraction de minerais	MJ d'énergie supplémentaire ou kg Fe éq. (minerai)	Ressources	MJ/unité émise
Energie non renouvelable	MJ totaux d'énergie non renouvelable ou kg pétrole brut éq.	Ressources	

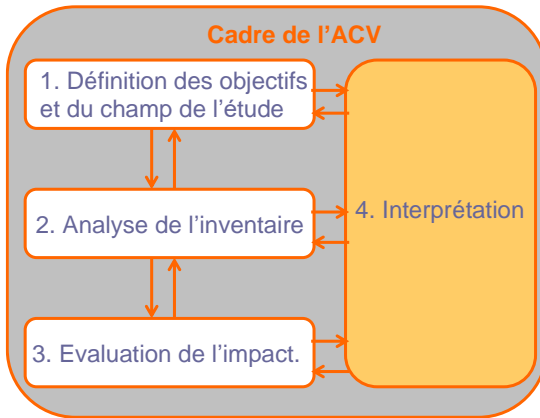
Catégories intermédiaires
Substances de référence,
Catégories de dommages et
Unités de dommages
utilisées dans IMPACT2002+

DALY : année éq. de vie perdue
Disability adjusted life years
PDF.m².an : fraction d'espèce
disparue sur un m² pour une
année



Facteurs de dommage IMPACT 2002+

Catégorie intermédiaire	Facteur de dommage	Unité
Toxicité humaine (cancérigène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]
Toxicité humaine (non cancérogène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]
Formation de photo-oxydants	2,13E-6	[DALY/kg éthylène]
Effets respiratoires	7,00E-4	[DALY/kg PM _{2,5}]
Destruction de la couche d'ozone	1,05E-3	[DALY/kg CFC-11]
Radiations ionisantes	2,10E-10	[DALY/Bq Carbone-14]
Ecotoxicité aquatique	5,02E-5	[PDF·m ² ·an/kg triéthylène glycol]
Ecotoxicité terrestre	7,91E-3	[PDF·m ² ·an/kg triéthylène glycol]
Acidification/Eutrophisation terrestre	1,04	[PDF·m ² ·an/kg SO ₂]
Acidification aquatique	1,00	[kg SO ₂ /kg SO ₂]
Eutrophisation aquatique	1,00	[kg PO ₄ ³⁻ /kg PO ₄ ³⁻]
Occupation des sols	1,09	[PDF·m ² ·an/m ² terre arable organique]
Changement climatique	1,00	[kg CO ₂ /kg CO ₂]
Extraction de minerais	5,10E-2	[MJ/kg Fe]
Energie non renouvelable	4,56E+1	[MJ/kg pétrole brut]



Chap. 4- Interpretation *Interpretation*

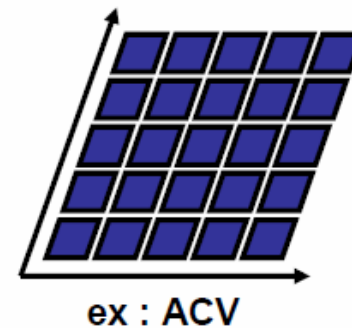
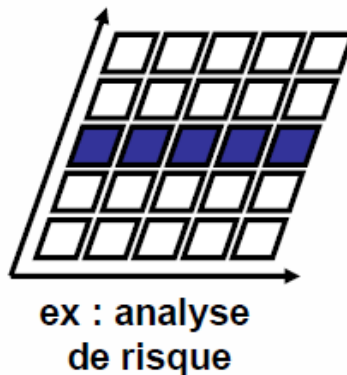
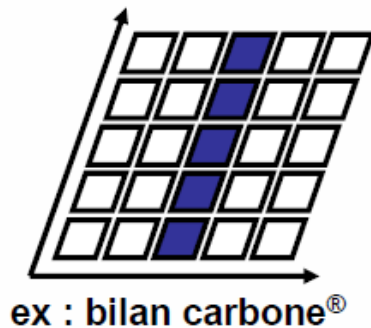
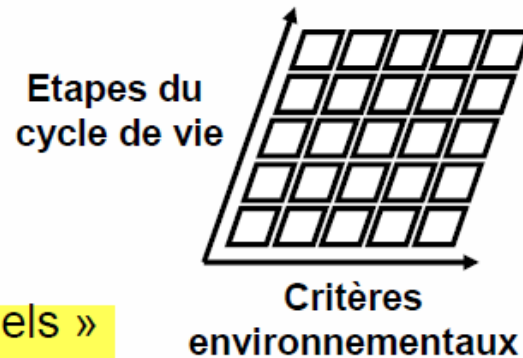
Interpréter les résultats pour:

- **Chaque niveau de l'ACV** : après l'inventaire des polluants, après la caractérisation et l'évaluation de l'impact global ;
- **Chaque phase du cycle de vie et chaque composant** en se concentrant sur ceux qui génèrent le plus grand impact et sur ceux qui offrent le meilleur potentiel de réduction de l'impact ;
- **Chaque polluant**, en examinant sa contribution respective.



Positionnement ACV

- Locale / globale
- Monocritère / multicritère
- Qualitative / quantitative
- Impacts « réels » / impacts « potentiels »





Une ACV: un outil pour agir !

En résumé:

- Choisir entre plusieurs scénarios celui qui a les impacts environnementaux les plus faibles ou qui représente le meilleur compromis
- Agir dès la conception d'un produit pour une plus grande durabilité (sur le produit, sur les technologies utilisées...)
- → écoconception
- • Elaborer des stratégies environnementales