



Ecoconception et l'analyse de cycle de vie des Produits et systèmes

Jean-Louis Bantignies

Polytech
Laboratoire Charles Coulomb
Université de Montpellier



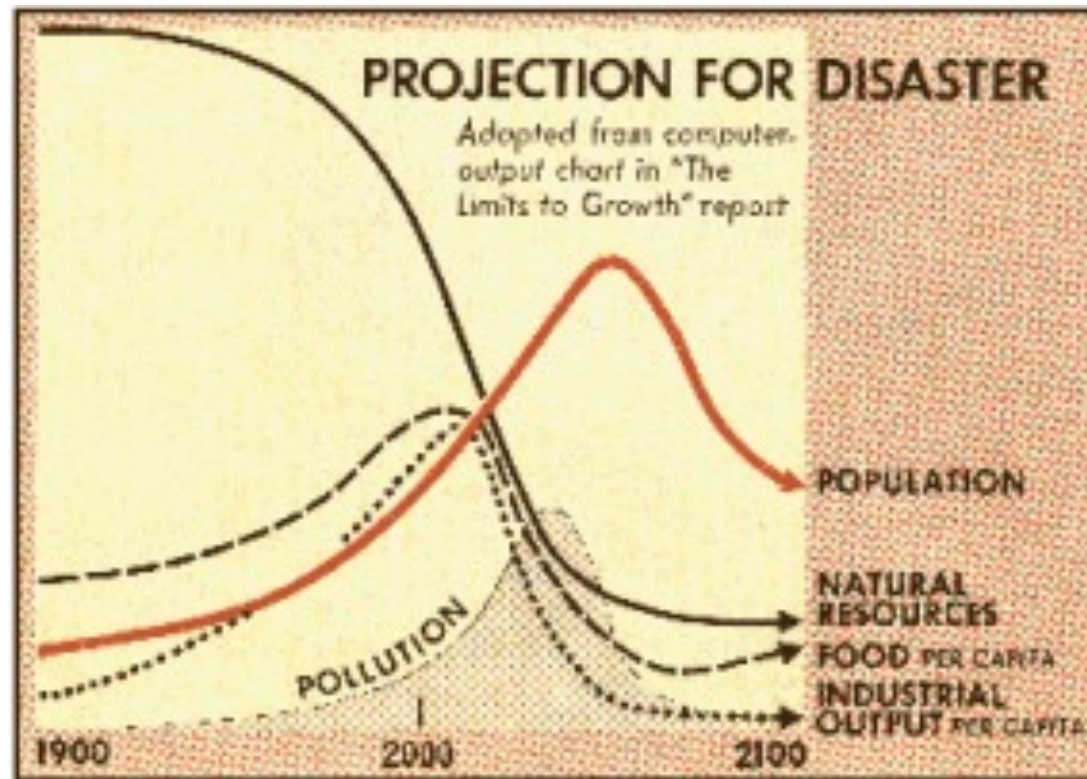
Mercredi 5 juin 2024 – JNM 2024

Plan

- **Genèse de l'écoconception**
- **ACV attributionnelle normalisée**
- **Calculs des impacts**
- **Illustration et points de vigilance**

Historique de l'écoconception

- **1968 -72** Prise de conscience que l'humanité évolue sur un système de taille finie aux ressources limitées...
=> Rapport the limit of the growth¹



¹Meadows et al. (1972) The limits of the growth, [ISBN 0-87663-165-0](https://www.amazon.com/Limits-Growth-Report/dp/0876631650).

Historique de l'écoconception

- 1969 Genèse de l'analyse de cycle de vie des produits

=> Premières analyses des impacts environnementaux : *REPA (Resource and Environmental Profile Analysis)*

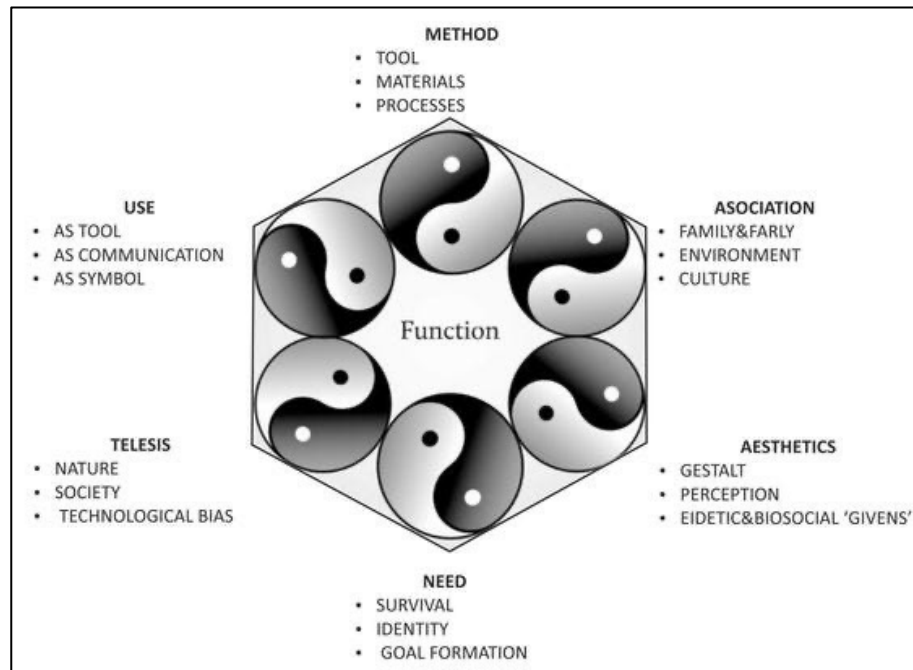
=> Coca Cola¹ 1969 (collab. Midwest Research Institute)



Historique de l'écoconception

- 1970 Emergence des enjeux d'une écoconception des produits (Eco Design)

- => Design pour un monde réel (Victor Papanek**)
- => Défense d'un »design« responsable d'un point de vue écologique et social
- => interrogation sur le service rendu et la durabilité des produits



* Papanek V. (1971). *Design for the Real World: Human Ecology and Social Change*, New York, Pantheon Books. ([ISBN 0-394-47036-2](#)).

**Hunt et Franklin (1996) LCA — How It Came About. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1, p. 7

Historique de l'écoconception

- **1980** Développement d'une communauté scientifique académique autour de l'écodesign
- **1989 -90** Développement des premiers logiciels et bases de données
=> SimaPro (Pays Bas 1990 , Gabi (Allemagne 1989)...
- **1990** Adoption terme *Analyse du Cycle de Vie (ACV)* *



Historique de l'écoconception

¹ <https://www.iso.org/fr/standard/76121.html>

² <https://www.iso.org/fr/standard/76122.html>

- 1997 harmonisation des méthodes d'Analyse de Cycle de vie

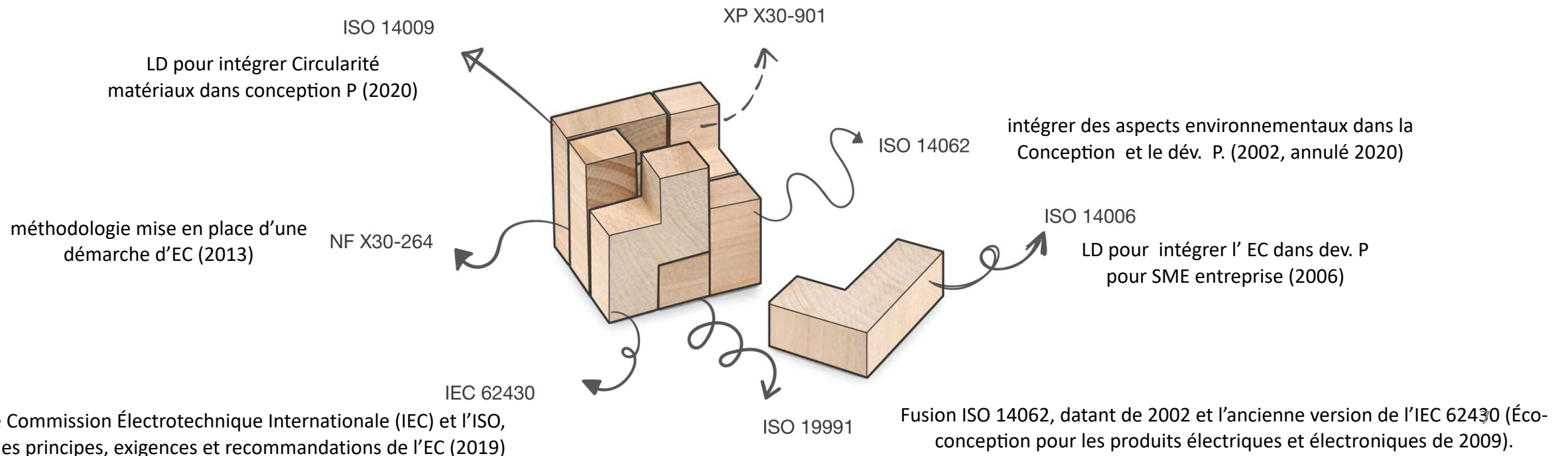
=> Normalisation ACV

=> ISO 14040(principe et cadre)¹

=> ISO 14044 (recouvrant ISO 14041, 14042,14043) (exigences et Lignes Directrices (LD))²



-2000... Multiplication du nombre de normes pour encadrer la démarche d'écoconception EC



Contexte réglementaire européen

- 2005 Directive UE ecodesign (directive 2005/32/CE) (voté 2007, mise en application 2008)

=> adressée aux producteurs

=> Directive EuP (energy-using products => **produits liés à l'énergie**).

=> Objectif : réduire la consommation des appareils électriques et électroniques grâce à l'écoconception

- 2009 Directive UE Ecodesign Erp (Directive 2009/125/EC)¹

=> Remplace directive 2005/32/CE

=> ErP (energy-related products).

=> But : obligation à l'écoconception des objets réduisant la consommation d'énergie et les impacts environnementaux (consommation d'eau, émissions, pollution, déchets, recyclabilité).

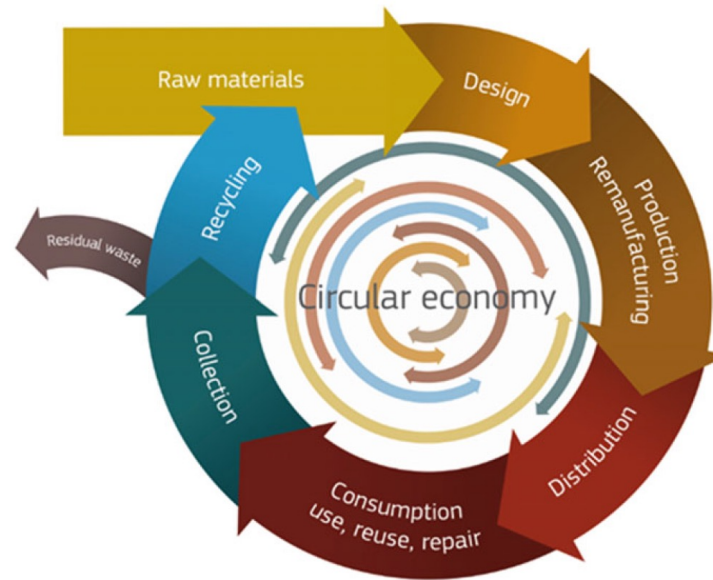
=> Framework directive (pas d'obligations de minimums quantifiés)



Contexte réglementaire européen

- 2022 Proposition réglementation UE sur l'écoconception des produits durables (ESPR)

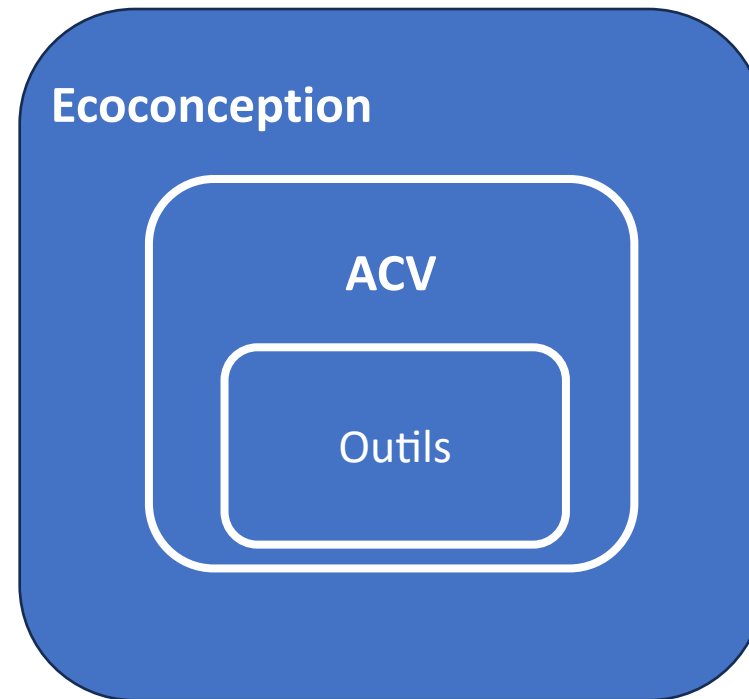
- => ESPR : Ecodesign Sustainable Product Regulation
- => extension directive 2009/125/CE aux produits non liés à l'énergie
- => Augmenter la circularité des produits.



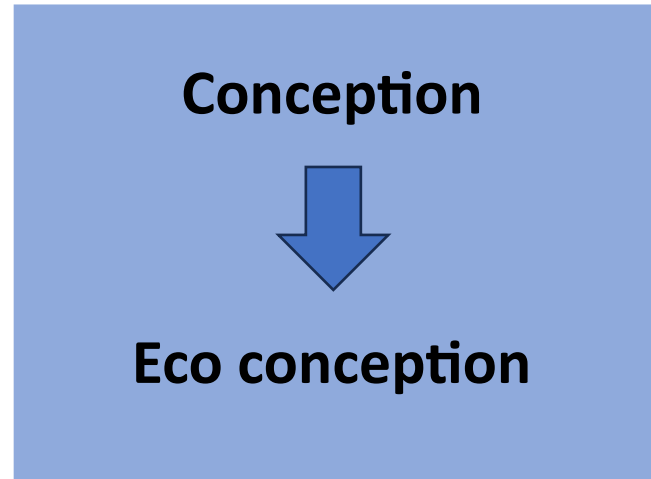
- 2024 Adoption réglementation UE ESPR

- => Objectif 1 : augmentation durabilité (réparabilité)
- => Objectif 2 : augmentation circularité (attention ressources)
- => Objectif 3 : interdiction obsolescence prématurée

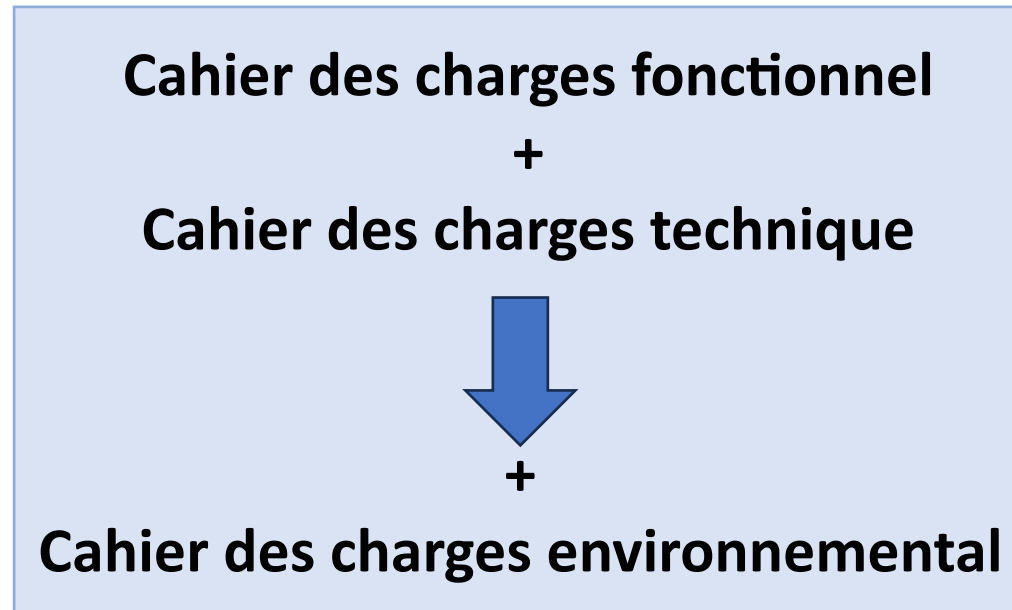
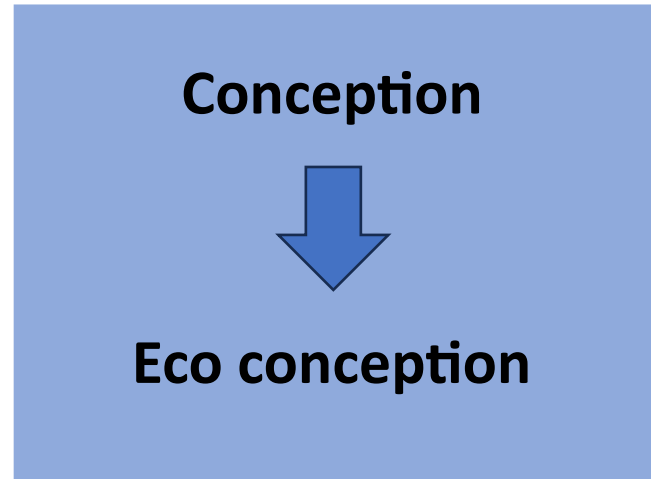




Passage de la conception à l'écoconception

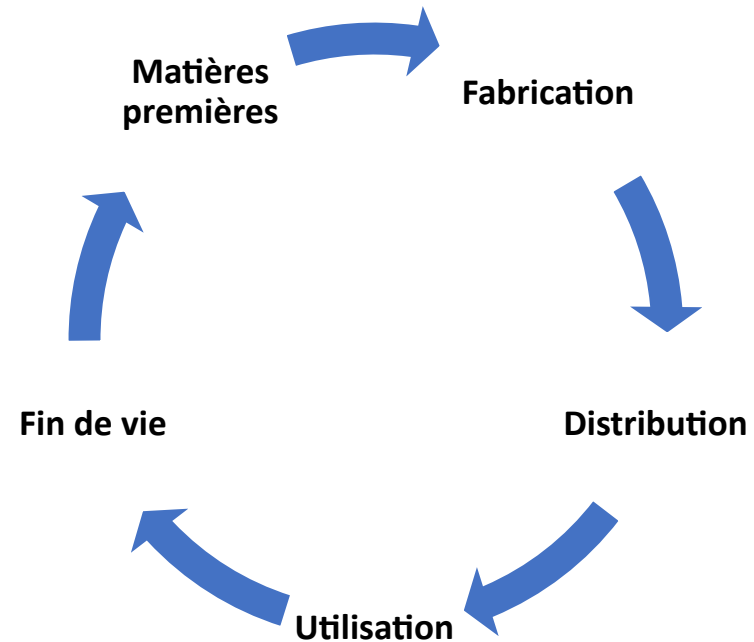


Définir l'écoconception



L'écoconception : cahier des charges environnemental

Démarche de conception qui doit permettre, à **performances égales**, de **minimiser les impacts environnementaux**, tout au long du **cycle de vie d'un produit ou d'un système**, dans un processus **d'amélioration continue** et à **coût maîtrisé**.



Les approches méthodologiques de l'ACV

ACV Attributionnelle

ACV statique

Modélisation des Impacts environnementaux à l'instant t survenant sur le cycle de vie du produit modélisant les flux physiques .

ACV Conséquentielle

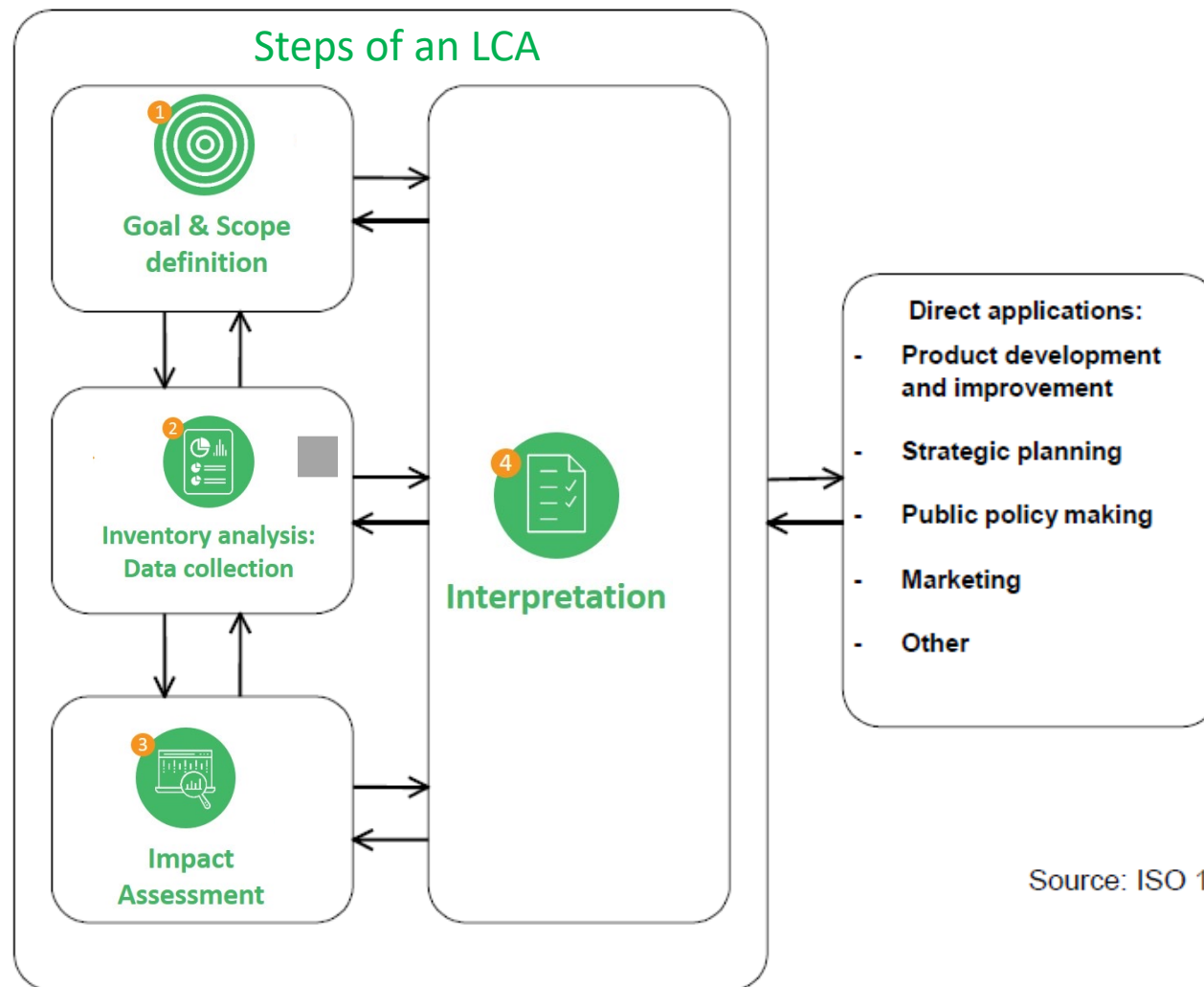
ACV dynamique

Modélisation des Impacts environnementaux consécutifs à un changement d'état dans le temps survenant sur le cycle de vie du produit.

ACV attributionnel : procédure standardisée : ISO 14040 (principe et cadre)

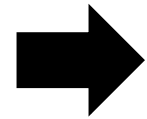
- Création : 1997 – 2000, révisée 2006

©

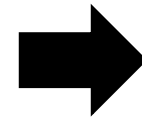


Source: ISO 14040

Notion cruciale : l'Unité Fonctionnelle

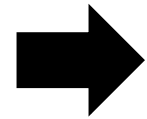


ACV de l'ampoule

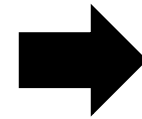


ACV du service rendu
par le produit = UF

Notion cruciale : l'Unité Fonctionnelle



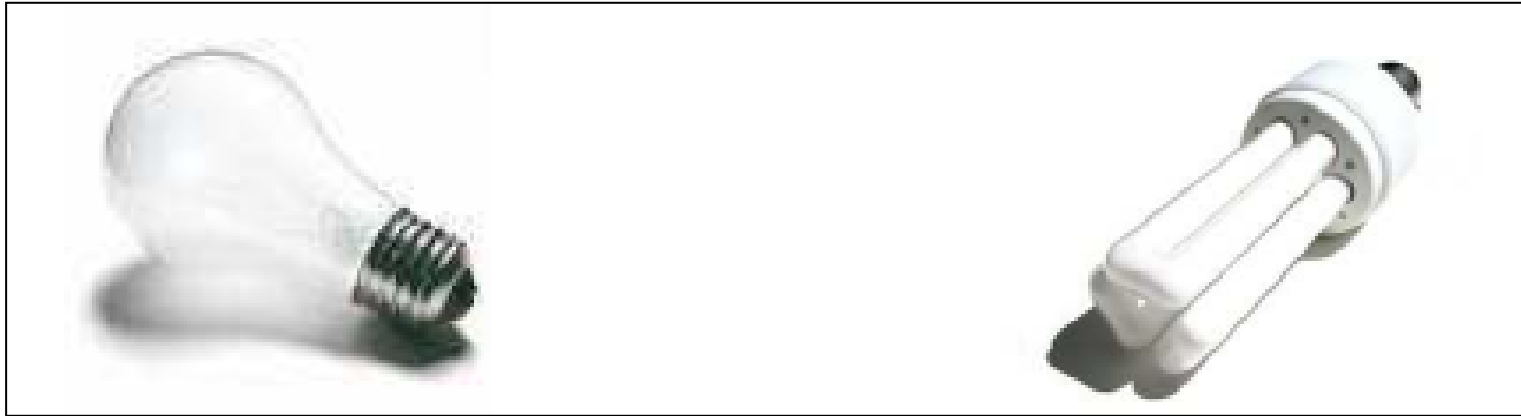
ACV de l'ampoule



ACV du service rendu
par le produit = UF

UF : 600 lumen* pendant 6000 heures

Comparaison Performance environnementale pour la même unité fonctionnelle

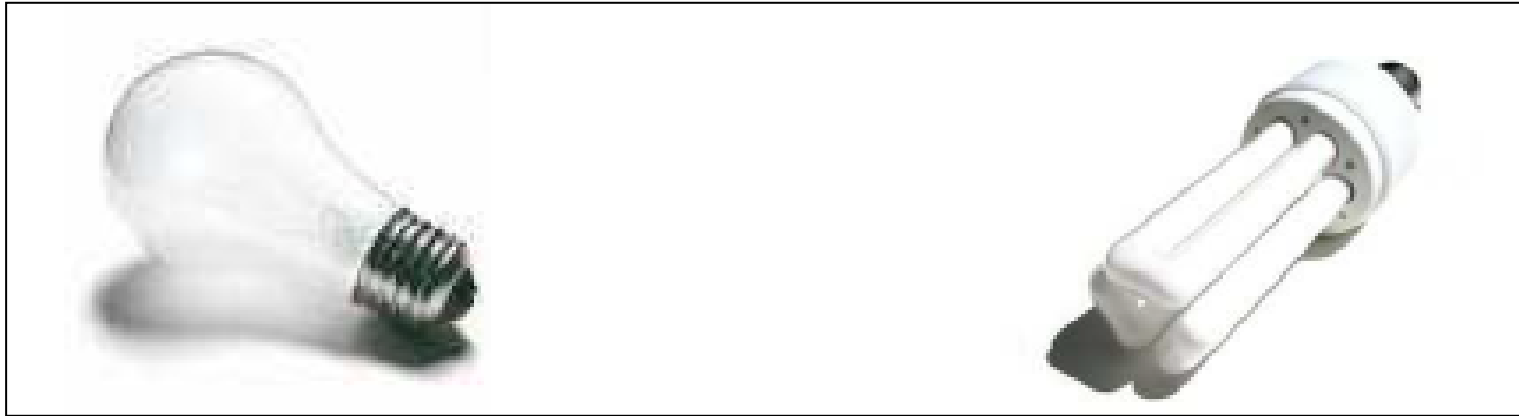


Il faut comparer les flux de références pour se ramener au service rendu equivalent

UF : 600 lumen* pendant 6000 heures

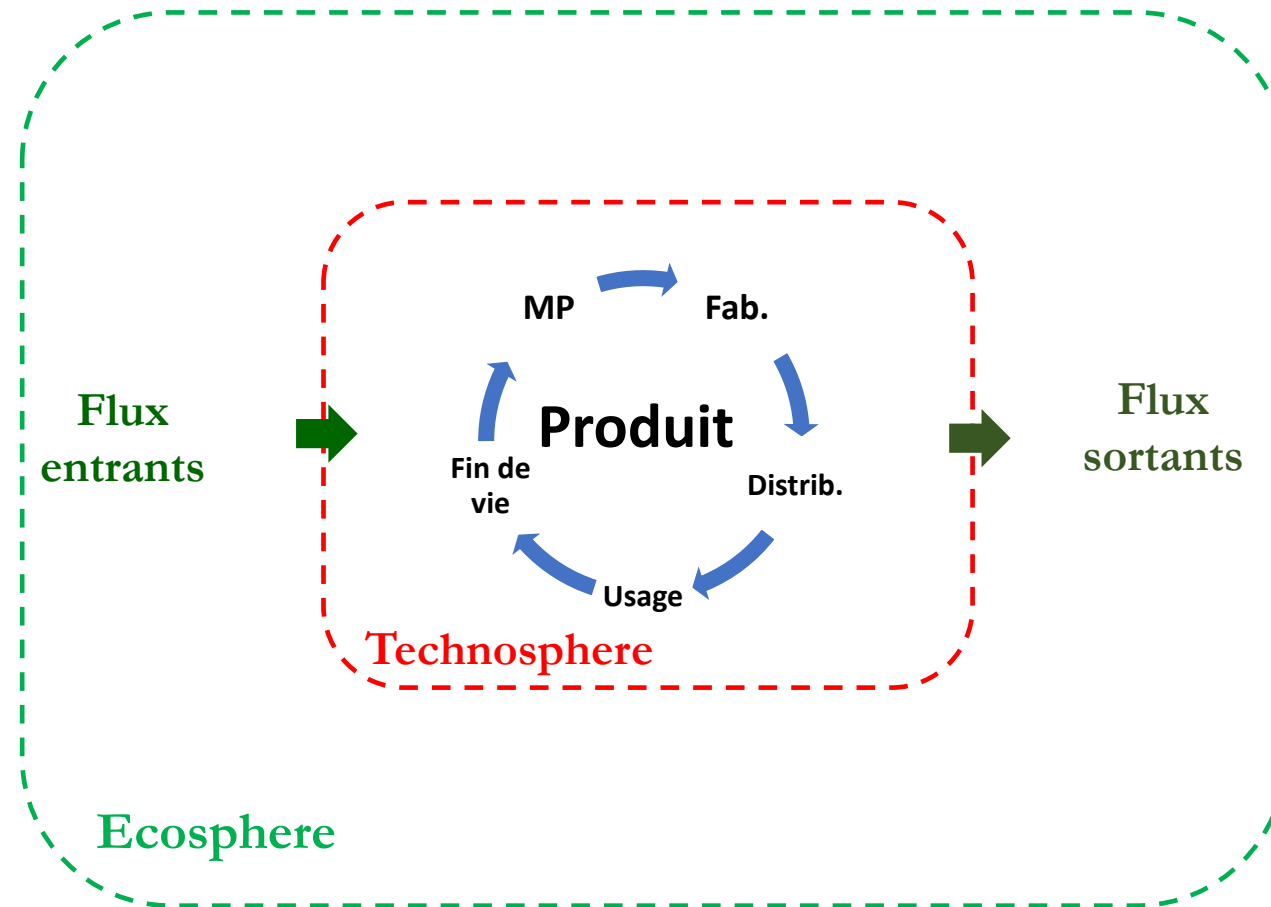
Comparaison Performance environnementale pour la même unité fonctionnelle

Service rendu (UF) : 600 lumen* pendant 6000 heures



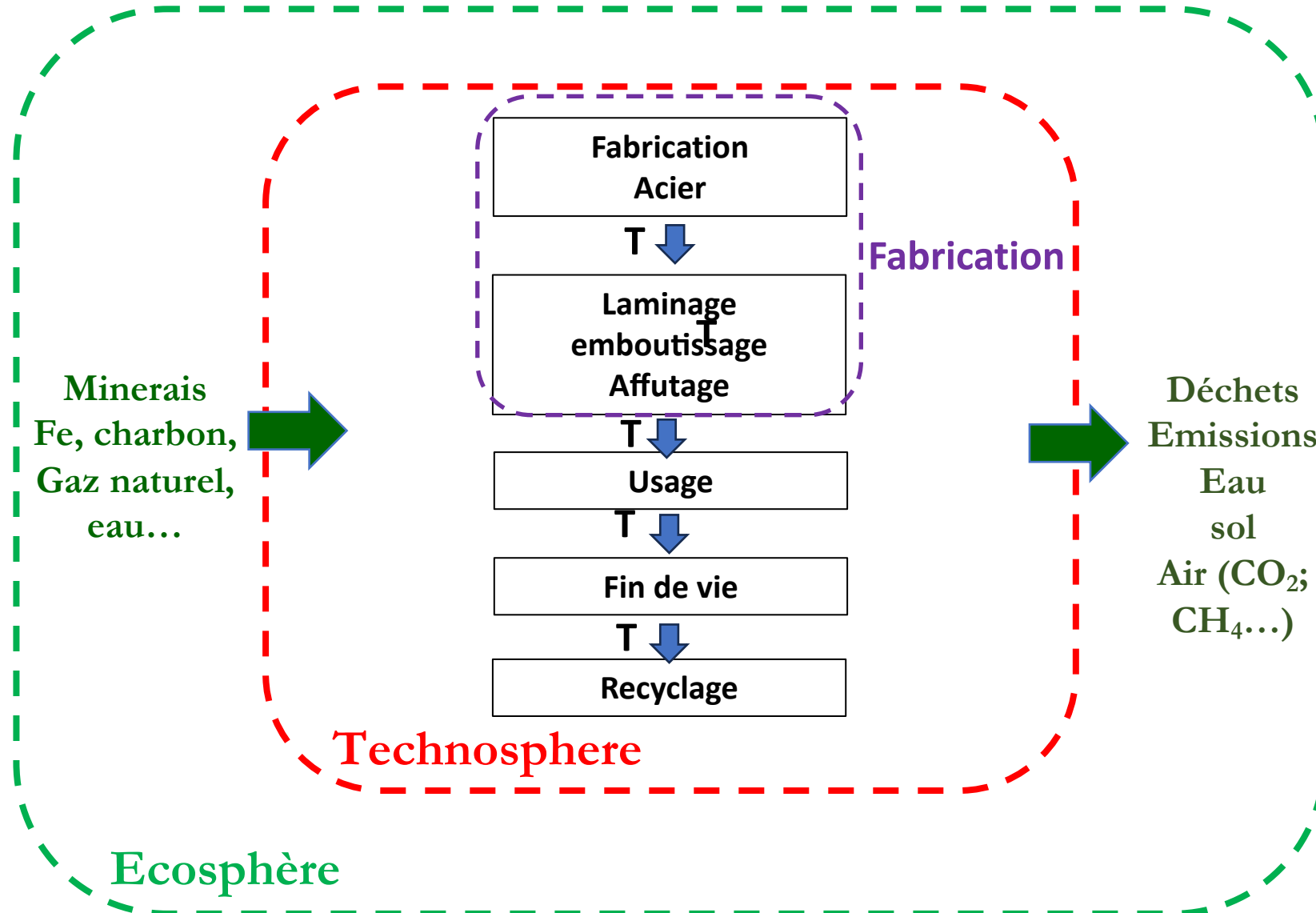
	Lumens	Durée de vie	Flux de références
Ampoule à incandescence (35 g)	60 W – 600 lm	1000 h	6 ampoules (210g, 360 kWh /UF)
Ampoule fluorescente (160 g)	11 W -600 lm	6000 h	1 ampoule (160g, 66kWh /UF)

Diagramme des flux

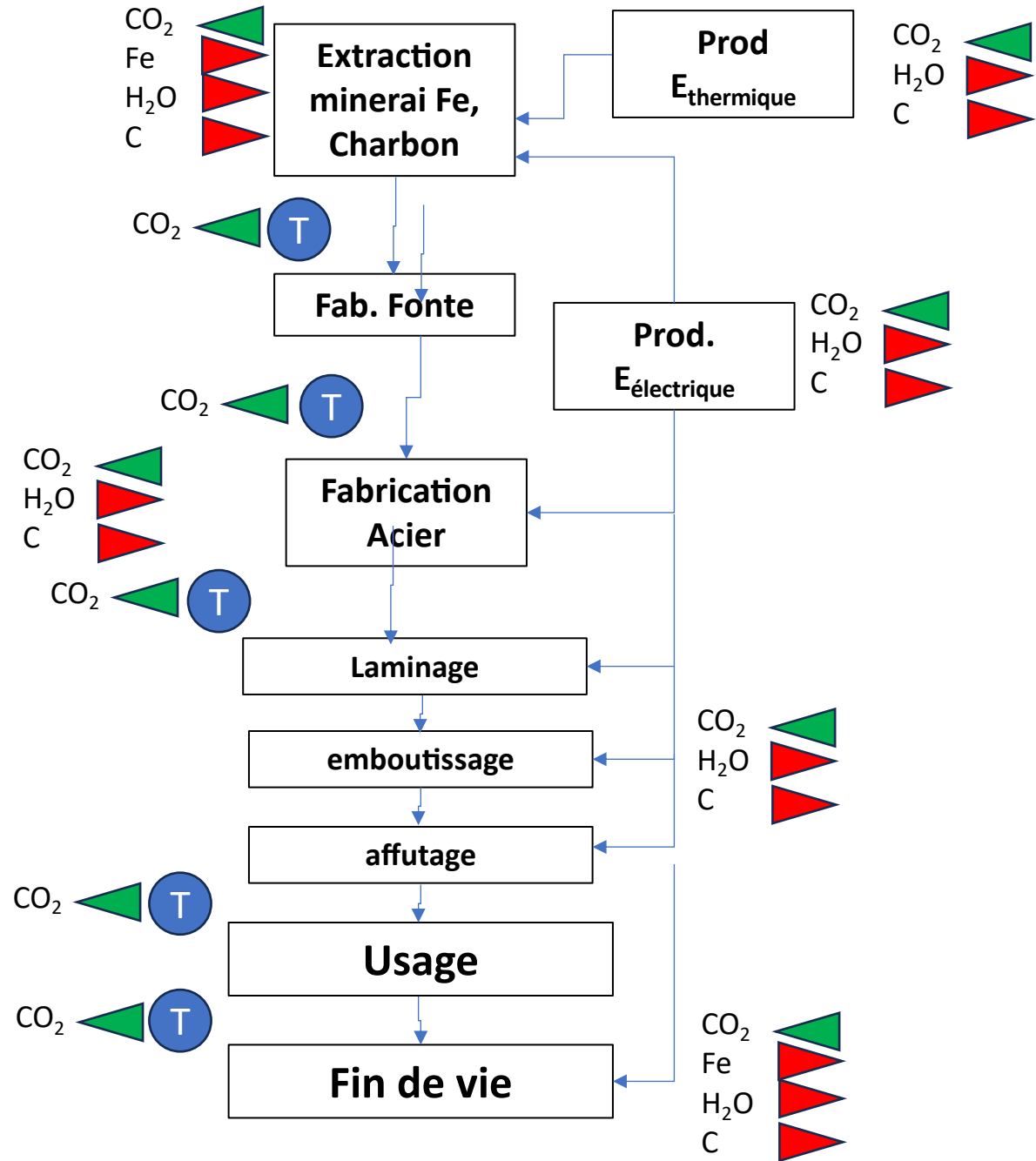


INVENTAIRE : Traduire le cycle de vie d'un produit / système en flux

Diagramme des flux par l'exemple



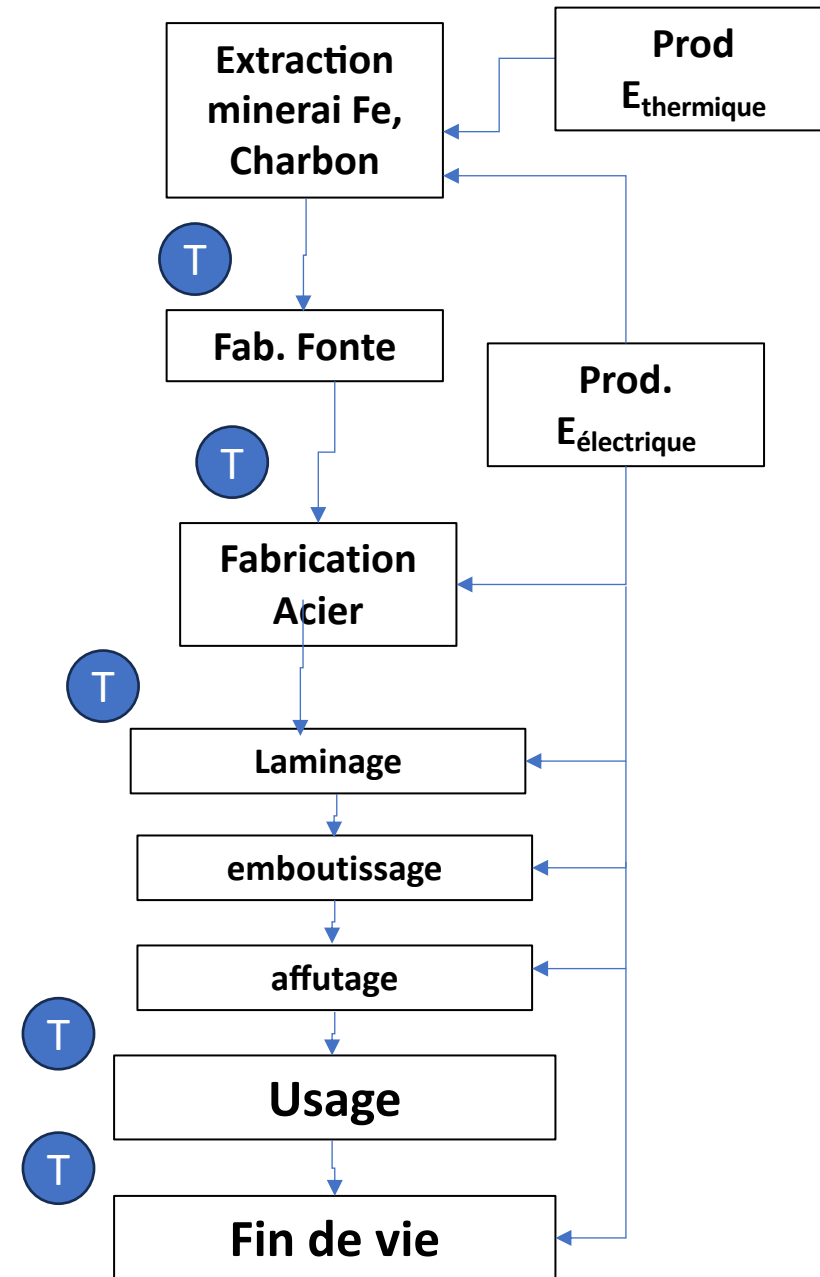
Inventaire des flux environnementaux



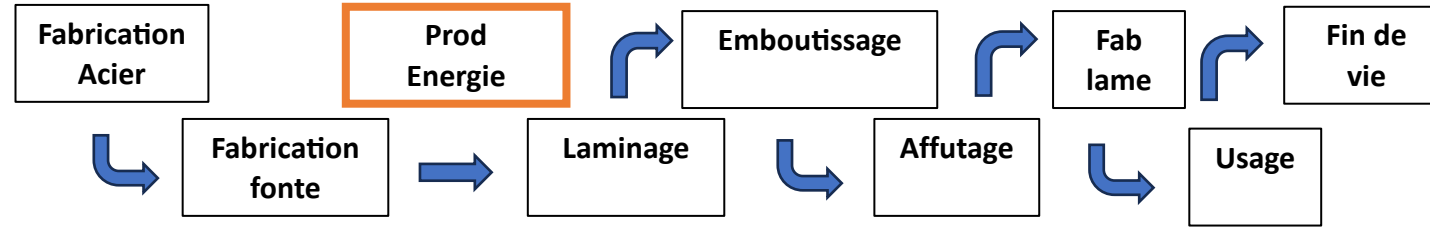
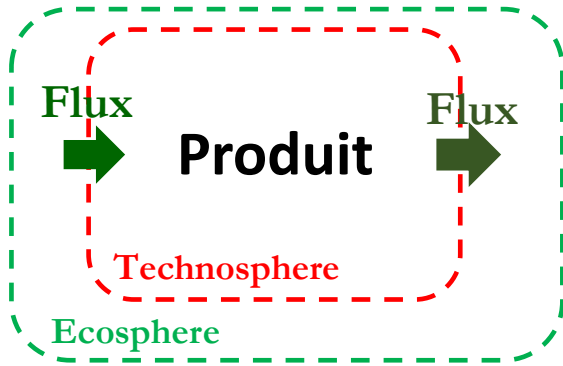
Inventaire des flux techniques



Modélisation de processus
Matériaux , procédés, services



Inventaire des flux du cycle de vie complet



- Acier (kg)
- Energie (MJ)
- Fonte (Kg)
- Laminage (Kg)
- Emboutissage (Kg)
- Affutage (Kg)
- Fabrication lame
- usage coupe (103m)
- dechet lame (Kg)
- Fe (Kg)
- CO₂ (Kg)
- Eau (m³)
- Charbon (Kg)

+1	0	0	0	0	0	-710^{-3}	0	+1
-0.1	-2	+1	-1.5	-2	-0.5	0	0	0
-0.9	+0.9	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	+1	0	0	-1	0	0
0	0	0	0	+1	0	-1	0	0
0	0	0	0	0	+1	-1	0	0
0	0	0	0	0	0	+1	-1	0
0	0	0	0	0	0	0	+1	0
0	0	0	0	0	0	0	+1	-1
0	-5	0	0	0	0	0	0	0
+0.8	+1.9	+0.12	+0.13	+0.15	+0.1	0	0	+1
-0.01	0	-0.01	-0.01	0	0	0	0	0
-0.3	0	-0.3	-0.3	0	0	0	0	0

**A = matrice
technologique**

**B = matrice
environnementale**

Calcul des flux environnementaux

Equation fondamentale pour calculer les flux environnementaux

$$B \times A^{-1} \times F = G$$

A = matrice technologique

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7 & 0 & +1 \\ -0.1 & -2 & +1 & -1.5 & -2 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ -0.9 & +0.9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{pmatrix}$$

B = matrice environnementale

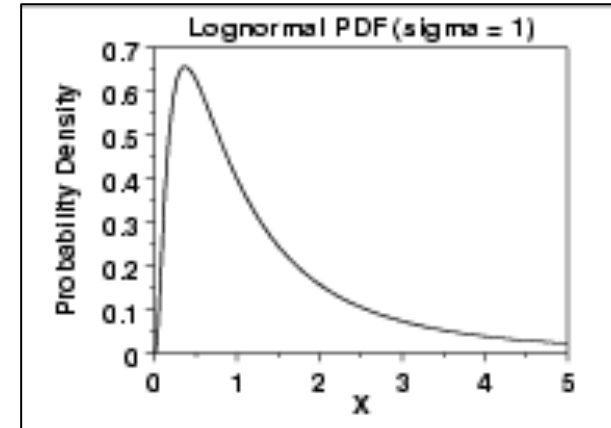
$$\begin{pmatrix} 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0.8 & +1.9 & +0.12 & +0.13 & +0.15 & +0.1 & 0 & 0 & +1 \\ -0.01 & 0 & -0.01 & -0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0 & -0.3 & -0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Utilisation de bases de données de processus...

Incertitude des données pour les processus génériques*

Matrice de Pedigree de Ecoinvent 3.0

Indicator score	1	2	3	4	5 (default)
Reliability	Verified ³ data based on measurements ⁴	Verified data partly based on assumptions or non-verified data based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimates	Qualified estimate (e.g. by industrial expert)	Non-qualified estimate
Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered, over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered or >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considered or some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites and from shorter periods
Temporal correlation	Less than 3 years of difference to the time period of the dataset	Less than 6 years of difference to the time period of the dataset	Less than 10 years of difference to the time period of the dataset	Less than 15 years of difference to the time period of the dataset	Age of data unknown or more than 15 years of difference to the time period of the dataset
Geographical correlation	Data from area under study	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from area with similar production conditions	Data from area with slightly similar production conditions	Data from unknown or distinctly different area (North America instead of Middle East, OECD-Europe instead of Russia)
Further technological correlation	Data from enterprises, processes and materials under study	Data from processes and materials under study (i.e. identical technology) but from different enterprises	Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials	Data on related processes on laboratory scale or from different technology



Ecart type géométrique (valable distribution log normale)

$$SD_{g95} := \sigma_g^2 = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2 + [\ln(U_b)]^2}}$$

with :

U_1 : uncertainty factor of reliability

U_2 : uncertainty factor of completeness

U_3 : uncertainty factor of temporal correlation

U_4 : uncertainty factor of geographic correlation

U_5 : uncertainty factor of other technological correlation

U_6 : uncertainty factor of sample size

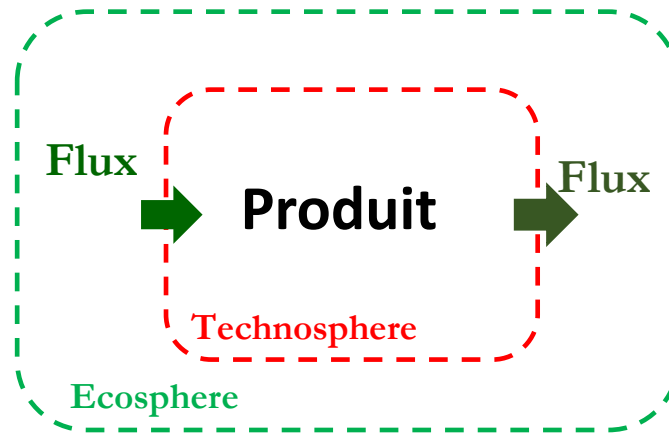
U_b : basic uncertainty factor

Facteurs d'incertitude

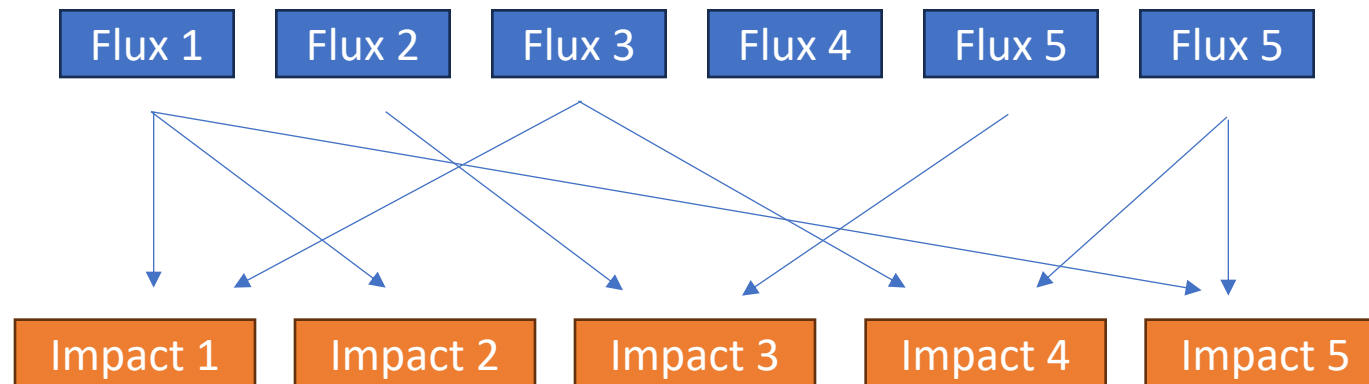
Indicator score	1	2	3	4	5
Reliability	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
Completeness	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
Temporal correlation	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
Geographical correlation	1.00	1.01	1.02		1.10
Further technological correlation	1.00		1.20	1.50	2.00
Sample size	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20

Les types de base de données

- Les bases de données généralistes : **ECOINVENT**, GABI, Base IMPACTS® de l'ADEME
- Les bases de données sectorielles :
 - Agroalimentaire : AGRIBALYSE, ACYVIA, WFLDB, AgriFootprint
 - Plastiques : PlastiqueEurope
 - Aciers : WorlSteel
 - EEE: EIME
 - Textile EIME-TEX, ICV-TEX, WALDB...
 - ...



Convertir l'inventaire des flux en impacts ?

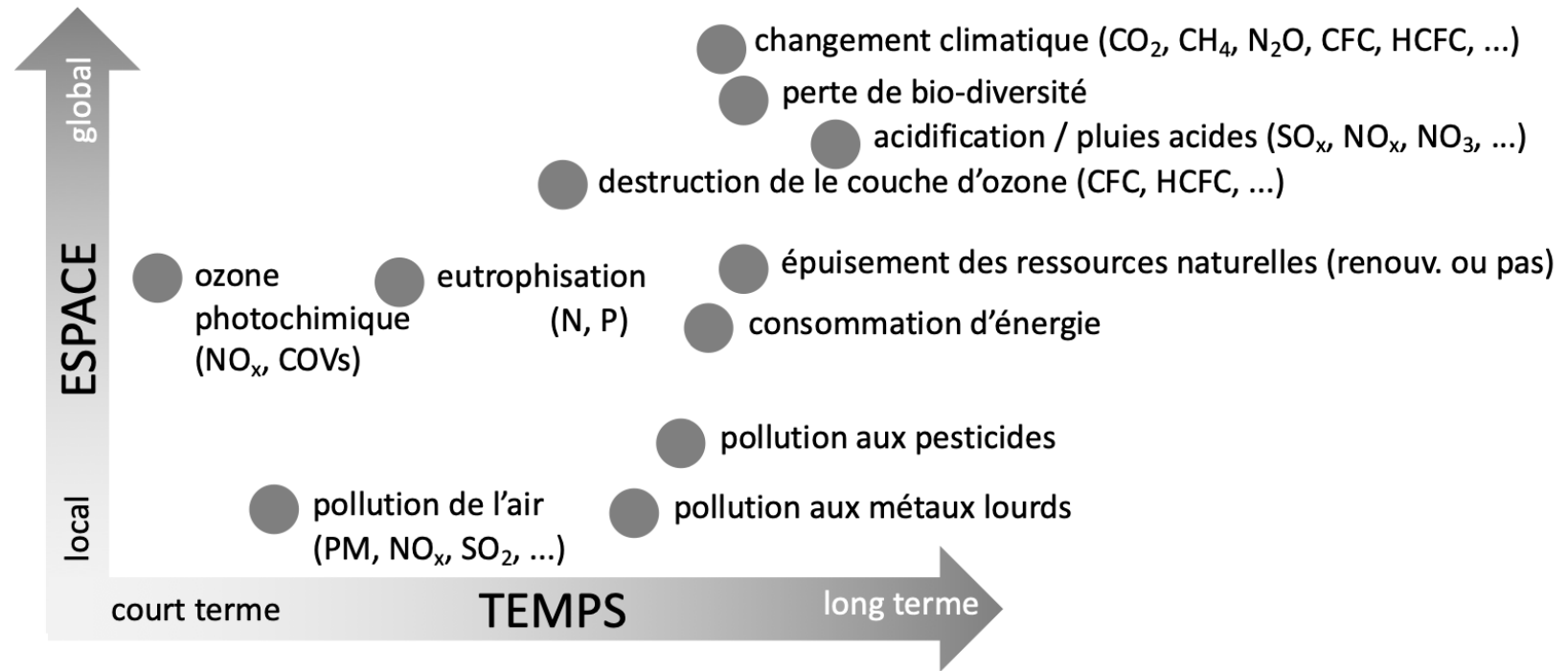


Calcul d'une catégorie d'impact

=

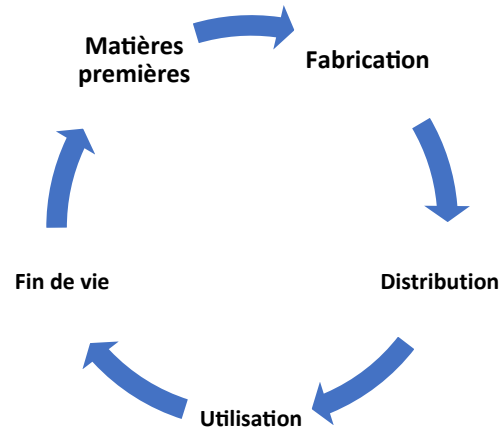
Agréger des flux de natures différentes

Calcul des impacts :

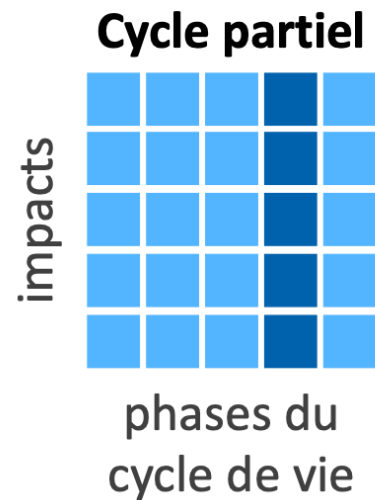
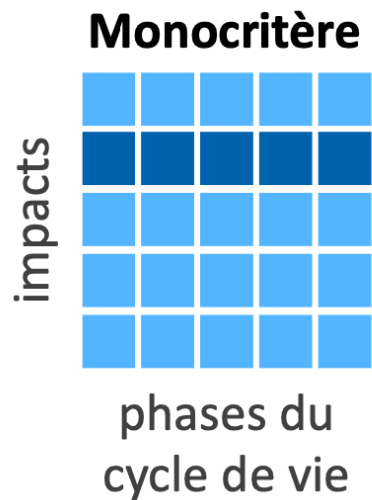


- **Différentes échelles : espace, temps**
- **Différents effets : concentrés, à distance, combinés, indirects , abrupts (seuils)...**

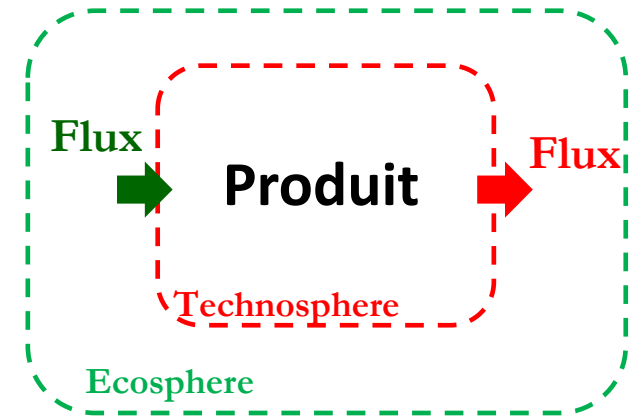
Calcul des impacts : Monocritère, Multicritères, multi-étapes



ACV Cradle to gate , grave, cradle.....



Calcul des impacts environnementaux



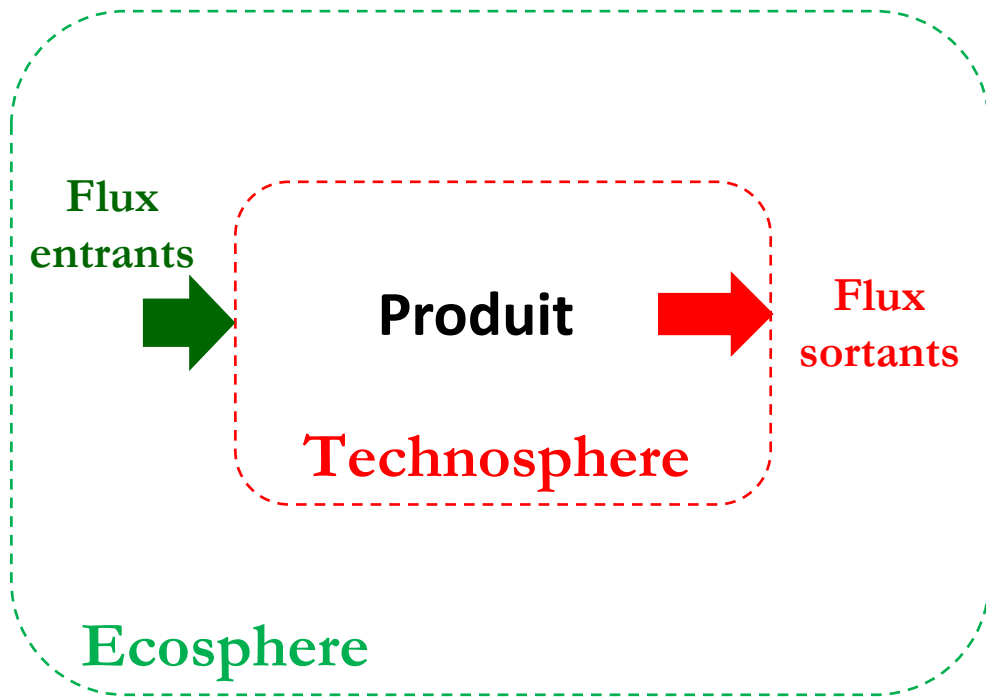
Midpoints (*problèmes*)

- toxicité humaine
- dispersion de radioisotopes
- destruction de l'ozone stratosphérique
- formation d'agents photo-oxydants
- éco-toxicité
- acidification des océans et des sols
- eutrophisation
- utilisation des terres
- réchauffement climatique
- atteinte des ressources abiotiques
- atteinte des ressources biotiques

Endpoints (*dommages*)

- santé humaine
- qualité des écosystèmes
- changement climatique
- ressources
- indicateur unique

Convertir les flux en impacts environnementaux Mid point



Calcul d'une catégorie d'impact environnemental I_i

$$I_i = \sum_s F I_{i,s} M_s$$

M_s flux de substance de type s (en masse)

$F I_{i,s}$ coefficient traduisant contribution substance s à l'impact I_i

=> **Flux entrants** => consommations de matière première, fluide....

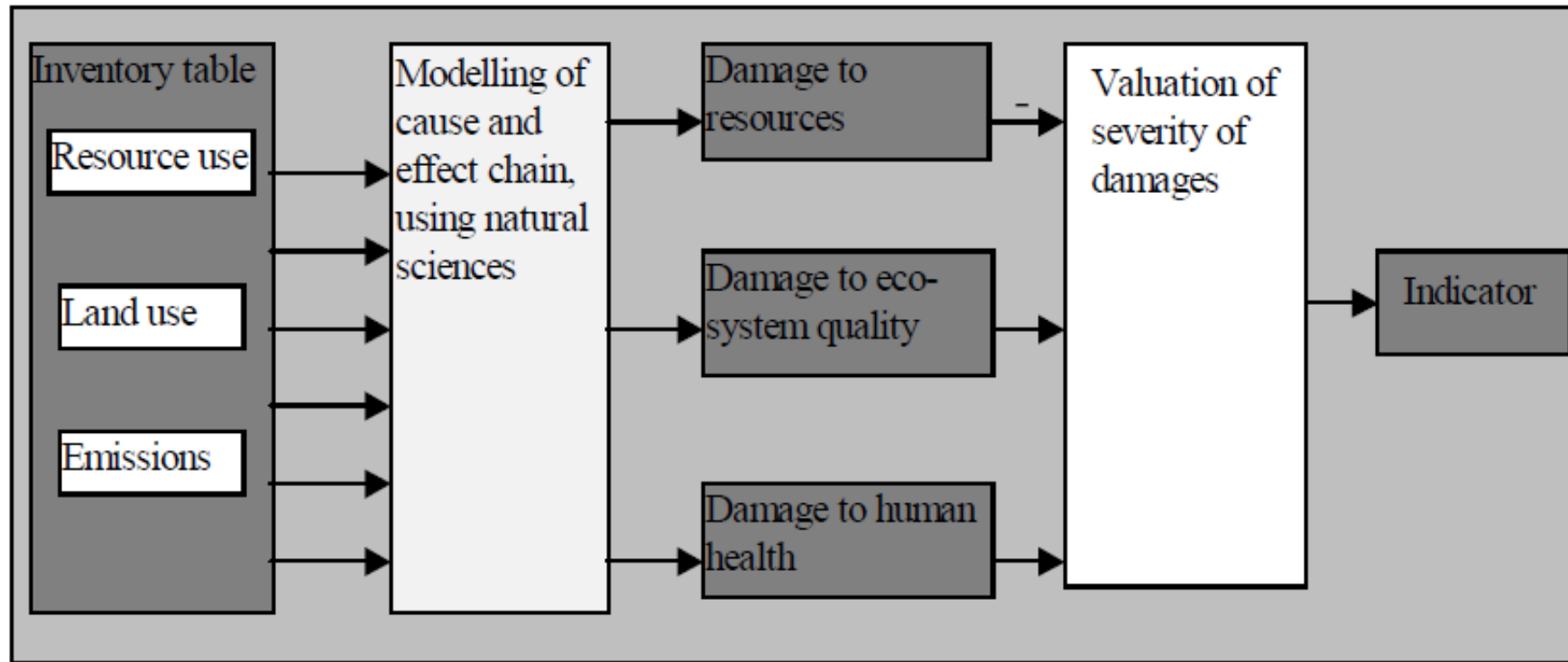
=> **Flux sortants** => émissions dans l'environnement (sol, eau, air)

} **Masses M_s !**

Impact assessment End point method

=>oriented damages

- **Structure of endpoint-oriented model (Eco-indicator 99)**



Impact assessment End point method

The damage characterization factors ($FD_{i,d}$) convert

The midpoint impacts FI_i to endpoint impacts SD_d

For an impact of category d

$$SD_d = \sum_i FD_{id} SI_i$$

The ($Fd_{i,d}$) linking the midpoint category i to the endpoint category d

Option
(same principle midpoint calculation)

$$SD_d = \sum_s FD_{sd} M_s \quad \text{avec} \quad FD_{sd} = FI_{s,i} \cdot FD_{i,ref,d}$$

La Méthode Product Environmental footprint (PEF)

Genèse : lancé par la Commission européenne dès 2013.

Objectif : définir une méthodologie d'ACV harmonisée au niveau européen

Cadre : La méthode est référencée dans les projets législatifs de la CE (mars 2022).

Caractéristique : 16 indicateurs environnementaux MidPoint. score global agrégeant l'ensemble des indicateurs, pondérés d'autres facteurs comme la durabilité et la réparabilité du produit.



Catégories d'impact midpoint retenues



Changement climatique,



Acidification



Toxicité humaine
(autre que cancer)



Toxicité humaine
(cancer)



Particules



Rayonnement ionisant



Appauvrissement
de la couche d'ozone



Formation d'ozone



Eutrophisation
terrestre



Eutrophisation
d'eaux douces



Eutrophisation marine



Écotoxicité
d'eaux douces



Utilisation des terres



Consommation d'eau

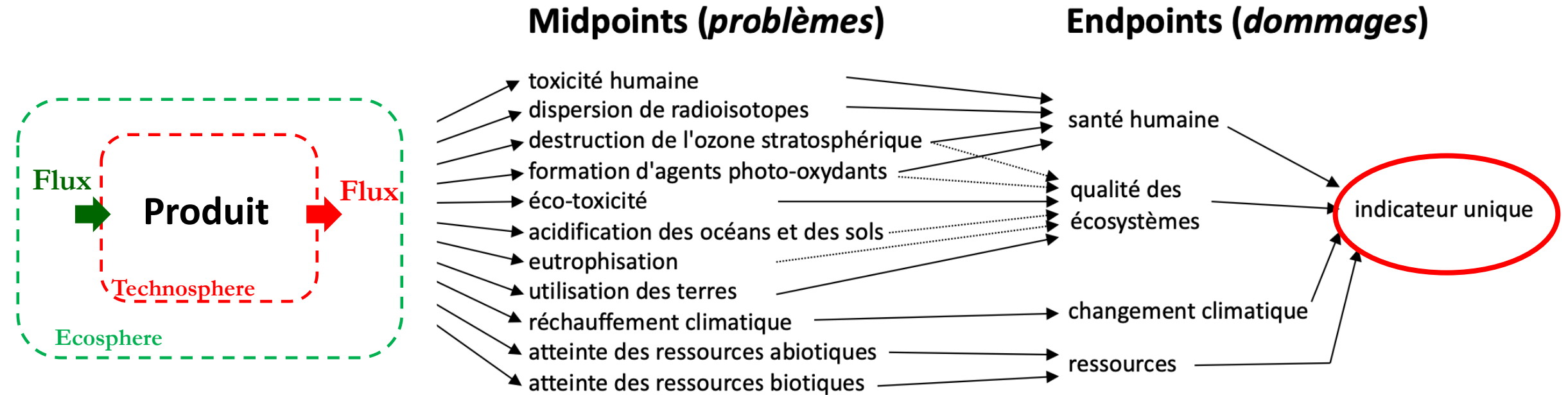


Épuisement des ressources
minérales et métaux



Épuisement des ressources
matières fossiles

Calcul des impacts environnementaux



Calcul d'un indicateur unique

Etape 1 : Normalisation

Les résultats de caractérisation des impacts sont rapportés à une valeur de référence (ex: émission moyenne d'un individu (Vn_i) sur une zone géographique pour une catégorie d'impact I_i)

$$N_i = \frac{I_i}{Vn_i}$$

Etape 2 : La pondération

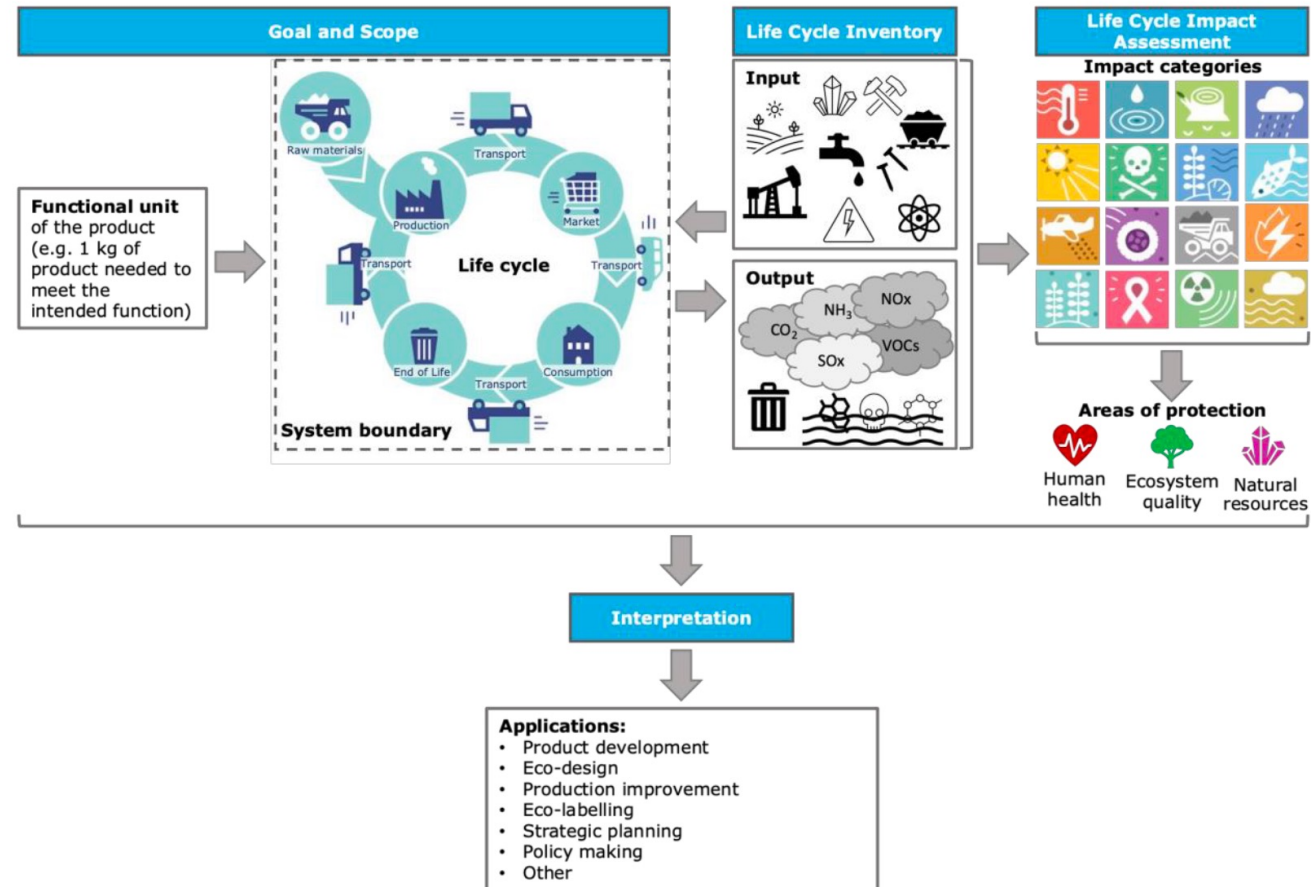
Elle tente de définir l'importance relative des scores de caractérisation normalisés. Le score unique IP peut se définir comme une agrégation pondérée par des facteurs Fp_i des N_i

$$IP = \sum_i Fp_i \cdot N_i$$

Facteur de normalisation pour obtenir le score unique pour la méthode PEF

Impact categories	Weighting factors (%)
Acidification	6,20
Climate change	21,06
Ecotoxicity, freshwater	1,92
Eutrophication, freshwater	2,80
Eutrophication, marine	2,96
Eutrophication, terrestrial	3,71
Human toxicity, cancer	2,13
Human toxicity, non-cancer	1,84
Ionising radiation, human health	5,01
Land use	7,94
Ozone depletion	6,31
Particulate matter	8,96
Photochemical ozone formation - human health	4,78
Resource use, fossils	8,32
Resource use, minerals and metals	7,55
Water use	8,51

Synthèse méthodologie ACV

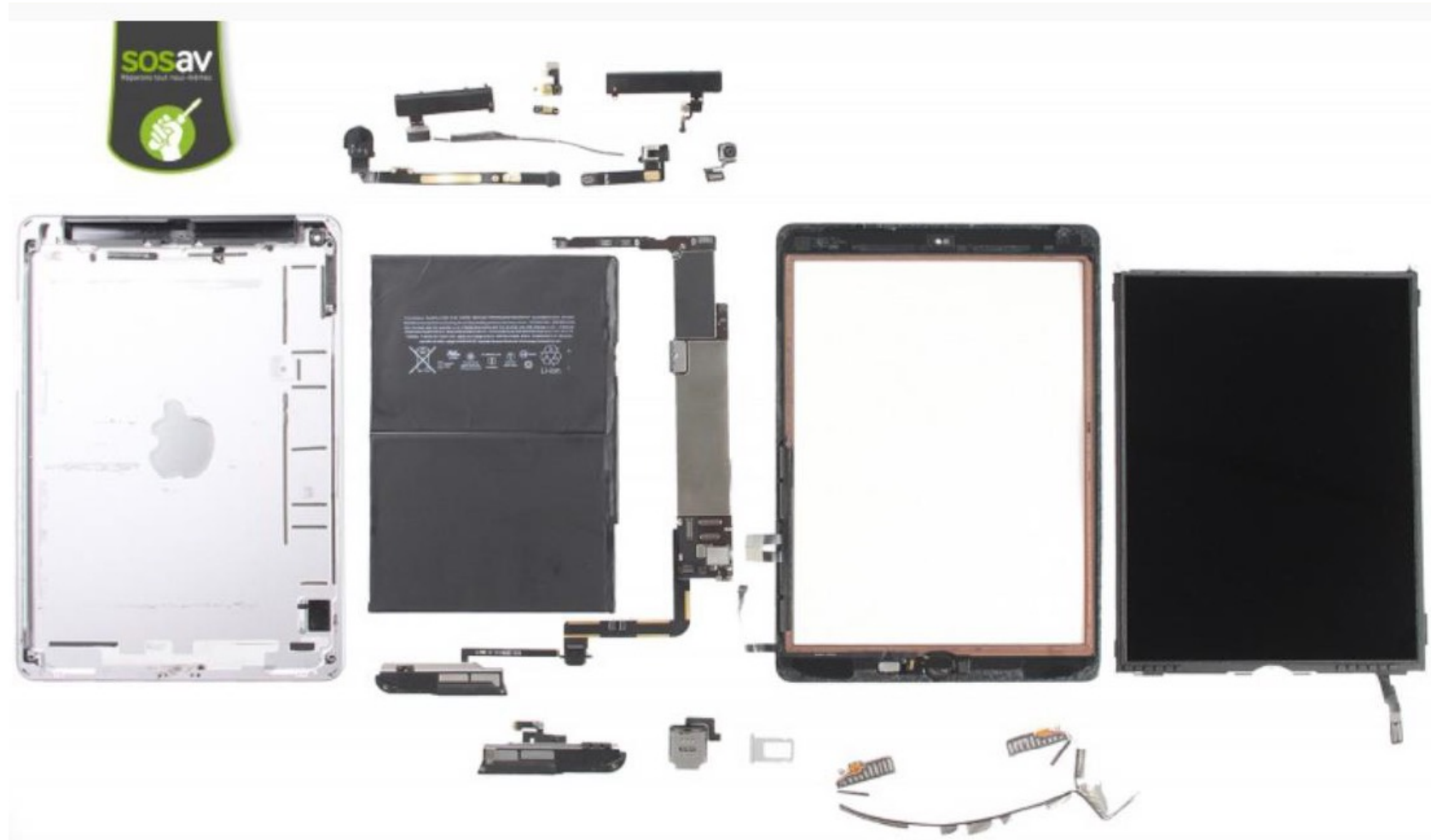


Generic workflow and applications of an LCA (U.E. PEF)

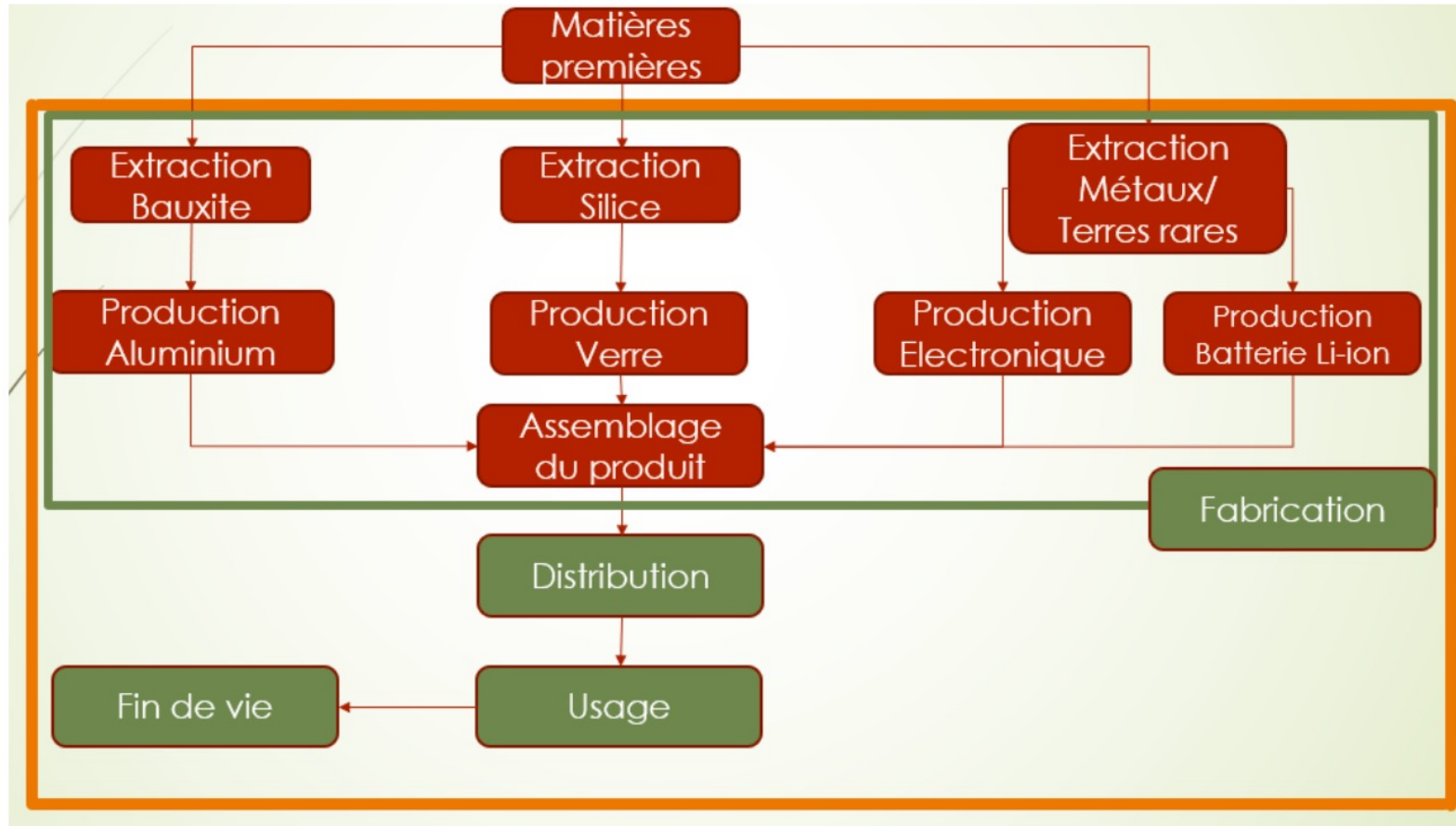
Illustration : ACV d'une tablette tactile



ACV d'une tablette tactile analyse matériau

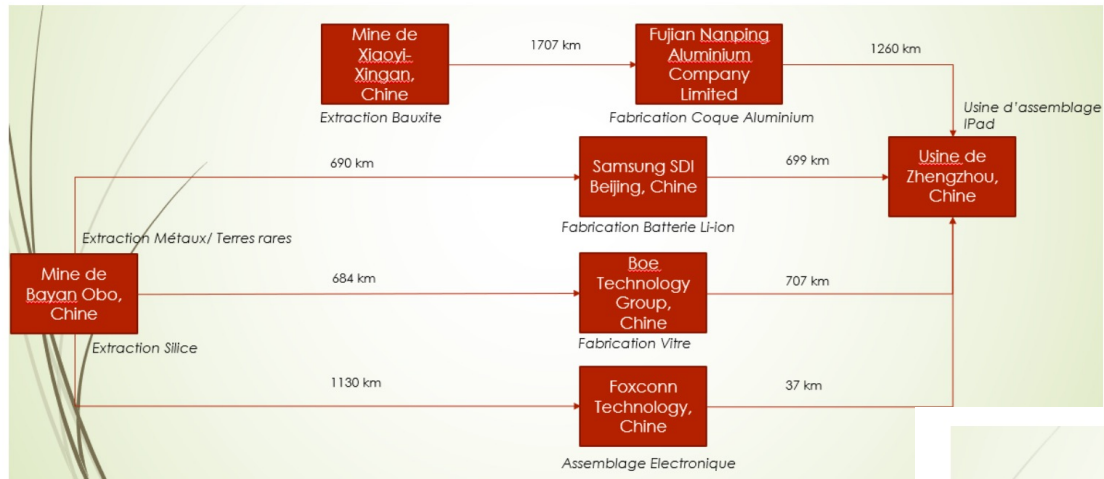


ACV d'une tablette tactile : champ d'étude

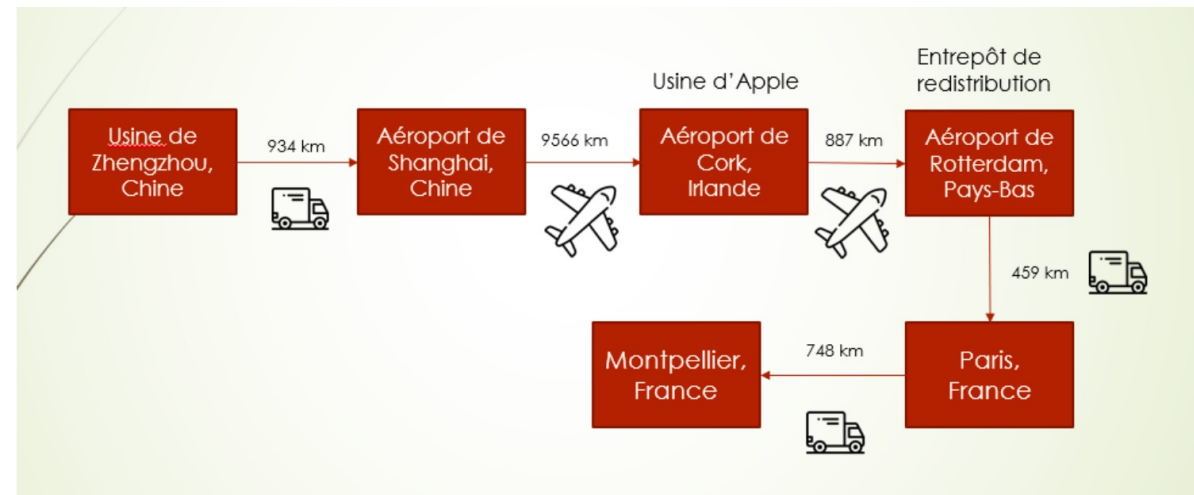


ACV d'une tablette tactile / diagramme des flux transport

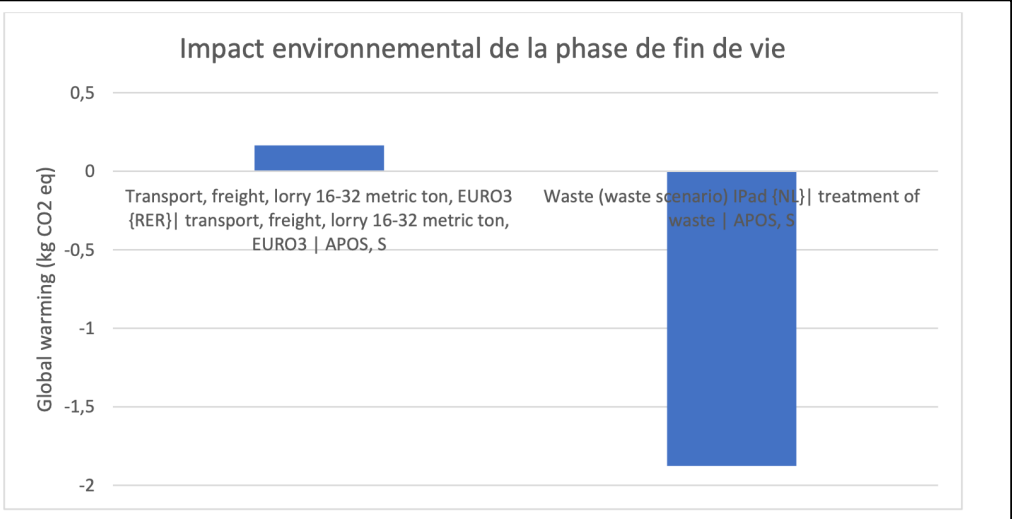
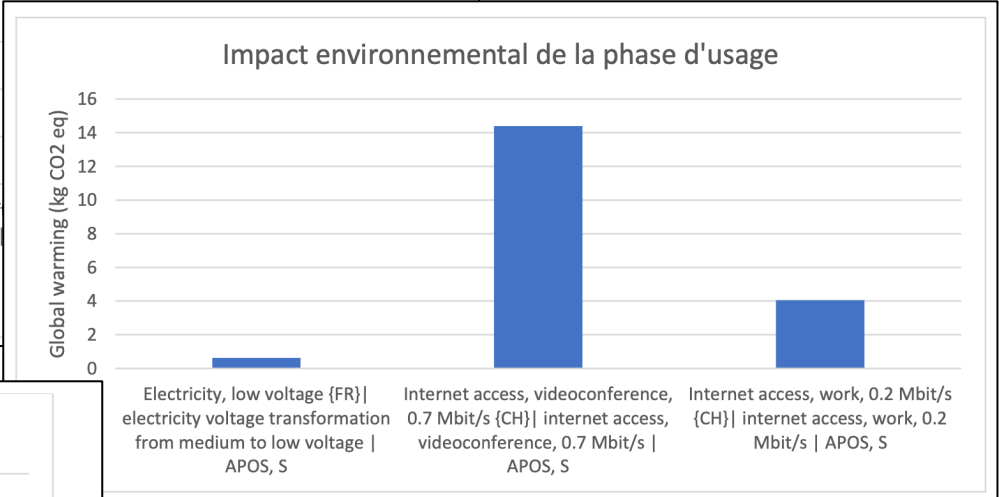
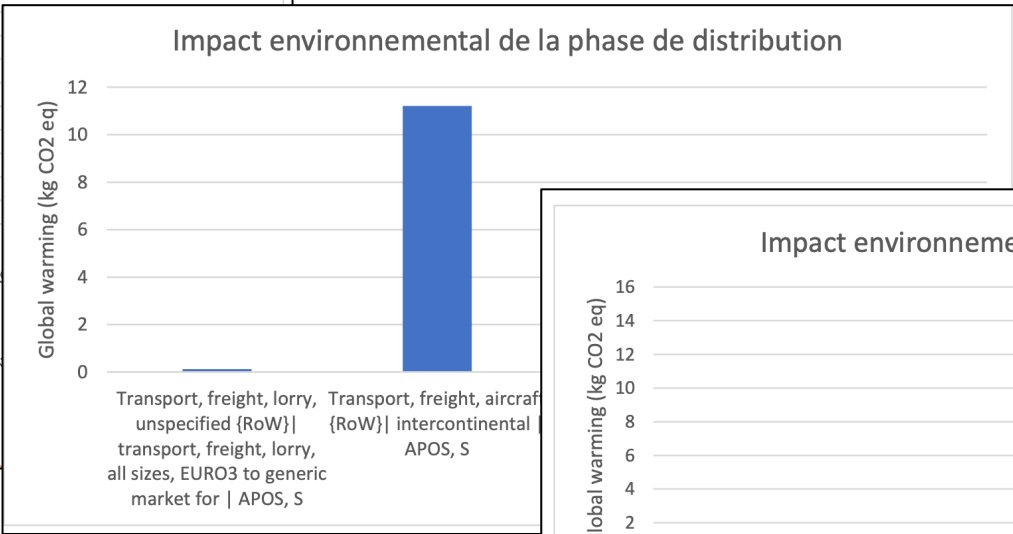
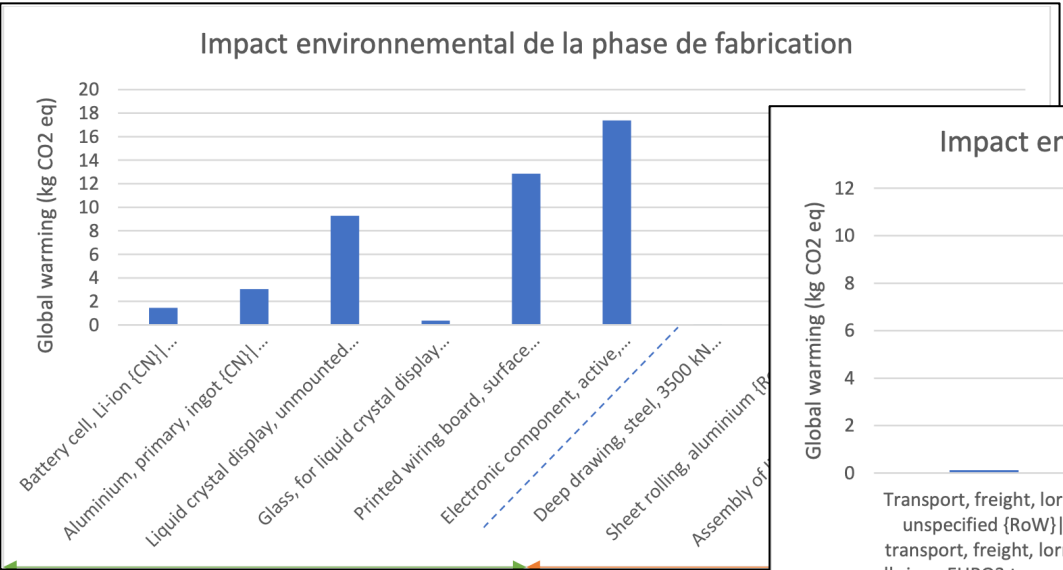
Fabrication



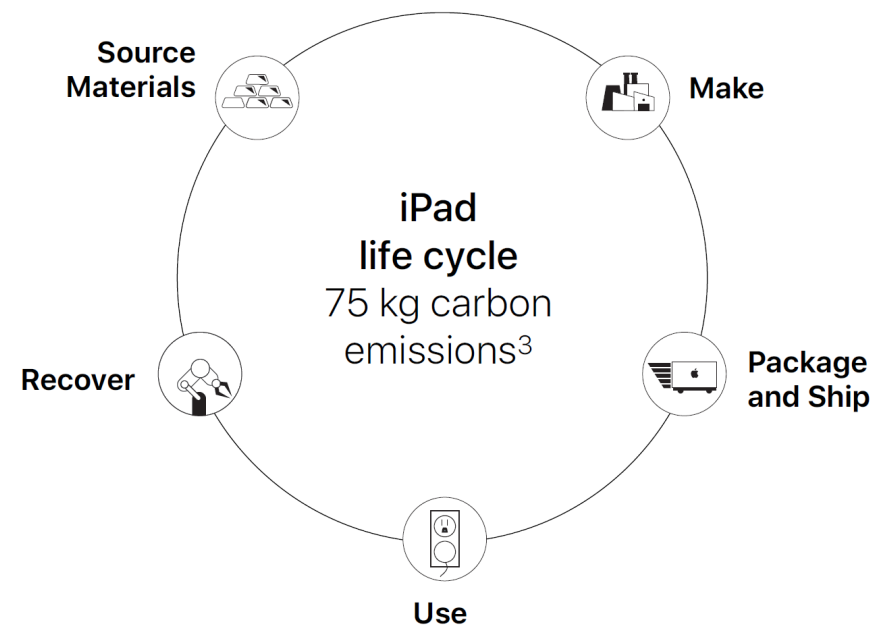
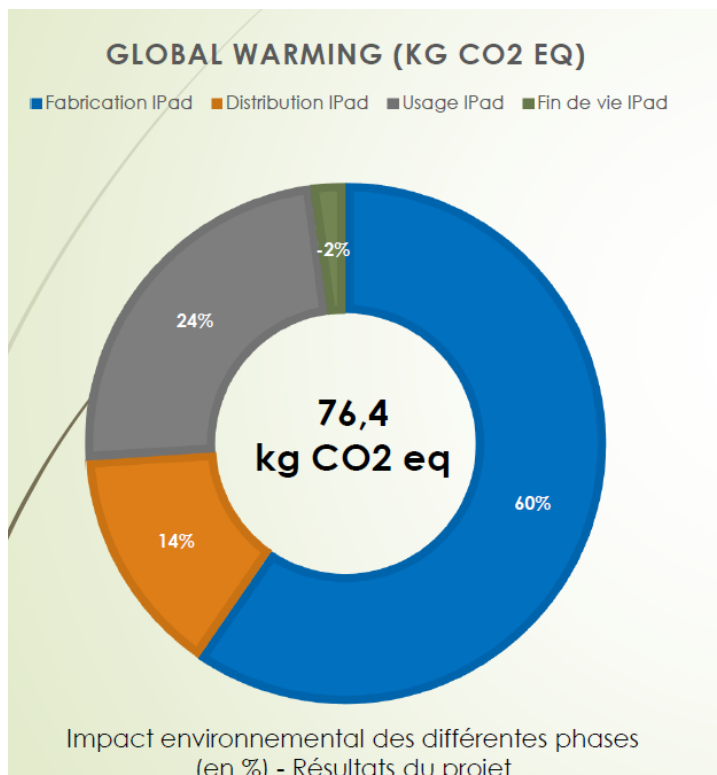
Distribution



ACV d'une tablette tactile : Impact réchauffement climatique



ACV d'une tablette tactile : Impact réchauffement climatique



https://www.apple.com › iPad_PER_Sept202

ACV d'une tablette tactile : Impact réchauffement climatique

Tablette (classique)

69,6 kg CO₂e / unité



Valeurs exprimées en kg CO₂e émis par produit comprenant la fabrication, la distribution et l'usage

[Source](#)

Détail de l'empreinte de 1 tablette (69,60 kg CO₂e)



■ Matières premières (?) ■ Approvisionnement (?) ■ Mise en forme (?) ■ Assemblage et distribution (?) ■ Usage (?)

On considère une durée de vie de 3 ans



[Voir le détail](#)

Incertitudes et utilisation des méthodes d'évaluation des impacts

Plusieurs types d'incertitudes à considérer :

- - Incertitudes sur les paramètres (distribution des valeurs)
- - Incertitudes sur le modèle de calcul d'impact.
 - hypothèse de linéarité des processus environnementaux (effets seuils négligés)
 - incertitude sur les modèles physico-chimiques pour la détermination des facteurs de caractérisation
- - Incertitudes liées aux hypothèses et aux choix
- - Incertitudes liées à la variabilité spatiale (chaines d'approvisionnement réparties sur l'ensemble de la planète...)
- - Incertitudes liées à la variabilité temporelle (évolution des performances et impacts technologiques)
- - Incertitudes liées à l'utilisation de processus génériques (on néglige la variabilité technologique)

- **Agir ou ne pas agir ?**

Impact CO₂ eq. d'une tablette sur la formation (3 ans) : 76 kg CO₂ eq.

- 3 jeans (25 Kg CO₂eq / kg)



- 3 Kg de bœuf (27 Kg CO₂eq / kg)




- 349 km transport voiture (217 g CO₂eq / km)



Impact CO₂ eq. d'une tablette sur la formation (3 ans) : 76 kg CO₂ equ.


909
jeans



104 779
km en voiture

• **0.6 km /étud /j. ou.**


20 369
litres de bière

• **0.1 l /étud /j. ouvré**


19 154
litres de vin


356 157
heures de streaming vidéo

• **2h /étud /j. ouvré**


150 039
km en avion
long courrier

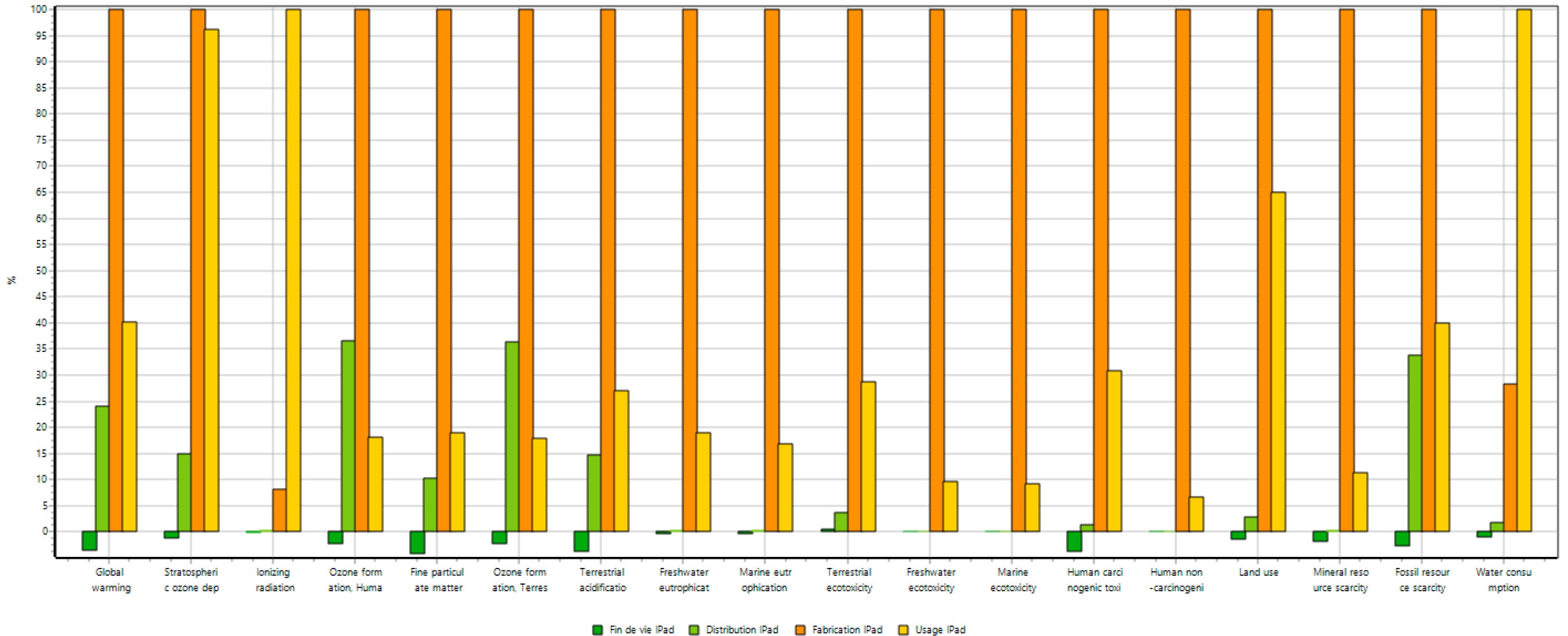
• **25 Paris - NY.**


85 369
litres d'eau en bouteille

• **0.5 l /étud /j. ouvré**

- **Voir de manière plus intégrative**

ACV d'une tablette tactile : Approche systémique multicritères



ACV d'une tablette tactile : Approche systémique multi impacts

Sé	Catégorie d'impact Δ	Unité	Fin de vie Ipad	Distribution Ipad	Fabrication Ipad	Usage Ipad
<input checked="" type="checkbox"/>	Global warming	kg CO2 eq	-1,71	11,5	47,6	19,1
<input checked="" type="checkbox"/>	Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-2,91E-7	3,83E-6	2,57E-5	2,47E-5
<input checked="" type="checkbox"/>	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-0,0136	0,139	3,86	48
<input checked="" type="checkbox"/>	Ozone formation, Human health	kg NOx eq	-0,00302	0,0497	0,136	0,0247
<input checked="" type="checkbox"/>	Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	-0,00449	0,011	0,108	0,0204
<input checked="" type="checkbox"/>	Ozone formation, Terrestrial ecosy	kg NOx eq	-0,00303	0,0504	0,139	0,025
<input checked="" type="checkbox"/>	Terrestrial acidification	kg SO2 eq	-0,00827	0,0332	0,226	0,061
<input checked="" type="checkbox"/>	Freshwater eutrophication	kg P eq	-0,000538	0,000276	0,127	0,024
<input checked="" type="checkbox"/>	Marine eutrophication	kg N eq	-3,55E-5	3,04E-5	0,0145	0,00243
<input checked="" type="checkbox"/>	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,7	13,3	365	105
<input checked="" type="checkbox"/>	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,00966	0,0236	20,8	1,99
<input checked="" type="checkbox"/>	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,00773	0,043	29,4	2,69
<input checked="" type="checkbox"/>	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-0,229	0,0743	5,95	1,84
<input checked="" type="checkbox"/>	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-0,196	0,772	713	46,8
<input checked="" type="checkbox"/>	Land use	m2a crop eq	-0,0196	0,0409	1,39	0,904
<input checked="" type="checkbox"/>	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	-0,0198	0,00346	1,12	0,127
<input checked="" type="checkbox"/>	Fossil resource scarcity	kg oil eq	-0,297	3,81	11,2	4,5
<input checked="" type="checkbox"/>	Water consumption	m3	-0,0108	0,0229	0,346	1,22

Passage De l'analyse d'impact monocritère à une analyse multicritères



≈ 150 kg matière première non renouvelable / fab. Ipad

≈ 100 m³ eau / fab. Ipad

Pour finir quelques remarques sur l'écoconception

- L'ACV quantifie les impacts environnementaux d'un produit ou d'un système.
- Ne pas cantonner l'écoconception à de l'*ingénierie* de l'éco-conception.
- L'ACV attributionnelle classique n'interroge pas le besoin.



- L'ACV au service de l'optimisation l'efficience matériel / service (au-delà de l'éradication de l'obsolescence) favorise l'effet rebond.
- Le design (qui interroge la fonction) et l'ingénierie de l'environnement (qui limite les impacts) sont indissociables pour interroger le service rendu par le produit

Pour finir quelques remarques sur l'écoconception



=> ne pas cantonner l'écoconception à de l'*ingénierie* de l'éco-conception,

Le design (qui interroge la fonction) et l'ingénierie de l'environnement (qui limite les impacts) sont indissociables pour interroger le service rendu par le produit

Quelques références Bibliographiques

- Analyse de Cycle de Vie, comprendre et réaliser un écobilan. O. Jolliet et al. Presses polytechniques et Universitaires Romandes, 2005, ISBN 978-2-88074-886-9
- The computational structure of life cycle assessment. R. Heijungs, S. Suh. Kluwer Publishing 2002
- Handbook of Input-Output Economics in Industrial science. S. Suh, G. Huppes. Springer, 2009
- Sensitivity coefficients for matrix-based LCA, R. Heijungs. Int. J. Life Cycle Assess. 2010.
- Life cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants. M. Huijbregts. Int. J. Life Cycle Assess. 2001
- The international Journal of Life Cycle Assessment. Coir www.ecomed.de
- Guide d'aide à la sélection de méthodes d'évaluation environnementales (Ademe 2021) <https://librairie.ademe.fr/ged/6490/>
- Development of a weighting approach for Environmental Footprint. European Commission, Joint Research Centre, Publication Office of the European Union, Luxembourg. Sala S, Cerutti AK, Pant R. (2018). ISBN 978-92-79-68041-0

Merci de votre attention