

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Introduction, applications

Thomas Gibon

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)

ENSAE – Enjeux environnementaux (OMI448)

5 avril 2024



LUXEMBOURG  
INSTITUTE OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY



# PLAN DU COURS

<b>01</b>	<b>Introduction à la méthode ACV et à son historique</b>	<b>13h30-14h10</b>
<b>02</b>	<b>Principes fondamentaux de l'ACV</b>	<b>14h15-14h45</b>
<b>03</b>	<b>Étude de cas</b>	<b>14h45-15h20</b>
<b>04</b>	<b>Conclusion</b>	<b>15h20-15h30</b>

# 01 | INTRODUCTION À LA MÉTHODE ACV ET À SON HISTORIQUE



# L'ACV, C'EST QUOI ?

## Science & Environment

### Climate change food c your diet's carbon foo

By Nassos Stylianou, Clara Guibourg and Helen Brigg  
BBC News

13 December 2018 | 248

UN climate change conferences

Your  
By Christopher

SCIENCE ENVIRON  
Are co  
bags?

Of course t

By Alessandra Poteratti Date: 13 Dec 2018 | 248 comments



<https://www.bbc.com/news/science-environment-46459714>

[https://www.theverge.com/2018/5/12/17337602/plastic-tote-bags-climate-ch  
environment](https://www.theverge.com/2018/5/12/17337602/plastic-tote-bags-climate-ch<br/>environment)

Photo: Photos: Corbis

<http://nymag.com/intelligencer/2013/02/your-paper-cup-is->

## Solar cells

### How clean is solar power?

## Nuclear power is the greenest option, say top scientists

Environmentalists urged to ditch their historical antagonism and embrace a broad energy mix

Steve Connor | @SteveAConnor | Sunday 4 January 2015 01:00 |

206 comments



Click to follow  
The Independent

<https://www.independent.co.uk/news/science/nuclear-power-is-the-greenest-option-say-top-scientists-9955997.html>

## EN ALLEMAGNE

### La voiture électrique émettrait plus de CO2 qu'un diesel



Écrit par Ioanna Schimizzi

Publié le 18.04.2019 • Édité le 18.04.2019 à 17:50

Partager



Une Tesla 3 émettrait entre 156 et 181 grammes de CO<sub>2</sub> par kilomètre selon l'étude, contre 109 grammes pour la dernière Mercedes classe C en motorisation diesel, une de ses concurrentes dans la catégorie des berlines moyennes premium. (Photo: Shutterstock)

<https://paperjam.lu/article/la-voiture-electrique-emetrai>

## TOP RECOMMANDÉS

1

### ARCHITECTURE • REAL ESTATE

Mipim 2024, les enjeux vus par six décideurs

2

### POLITIQUE

Un scrutin social aux enjeux multiples

3

### INSTITUTIONS

«Malgré la crise, le Luxembourg a beaucoup de choses à montrer»

4

### MARCHÉS FINANCIERS

Stephan Leithner nouveau CEO de Deutsche Börse

LUXEMBOURG  
OF SCIENCE  
TECHNOLOGY

LIST  
hydrogen-electric cars

# L'ACV, C'EST QUOI ?

## Exemple : question au gouvernement luxembourgeois du 19 juin 2017

Quelles remarques pouvez-vous faire...

- biais de comparaison ?
- imprécision des termes ?
- limites du raisonnement ?

Monsieur le Président,

J'ai l'honneur de vous informer que, conformément à l'article 80 de notre Règlement interne, je souhaite poser la question parlementaire suivante à Monsieur le Ministre du Développement durable et des Infrastructures et à Madame la Ministre de l'Environnement:

*« Ces jours, la presse allemande cite une étude du ministère de l'environnement suédois qui aurait conclu que la fabrication des batteries pour voitures électriques pourrait être beaucoup plus polluante que communément admis. Pour certains modèles de voitures électriques actuellement sur le marché seul la pollution engendrée par la production des batteries serait équivalente à celle émise de la conduite d'une voiture à moteur à combustion pendant 8 ans.*

*Dans ce contexte, j'aimerais poser les questions suivantes à Monsieur le Ministre du Développement durable et des Infrastructures et à Madame la Ministre de l'Environnement:*

- *Les Ministres ont-ils connaissance de l'étude suédoise citée par la presse allemande et sont-ils en mesure de confirmer les assertions reportées ?*
- *Est-ce que les Ministres ont accès à d'autres analyses sur les implications environnementales de la production des voitures électriques, et quels en sont le cas échéant les résultats ?*
- *Les Ministres sont-ils d'avis que ces conclusions pourraient avoir un impact sur la politique nationale par rapport aux voitures électriques ? »*

9, rue du St. Esprit  
B.P. 510  
L-2015 Luxembourg

Tel. : 22 41 84 1  
Fax : 47 10 07

dp@dp.lu  
www.dp.lu

# L'ACV, C'EST QUOI ?

Une méthode et un outil pour attribuer des impacts environnementaux à un produit ou un service

En considérant les impacts sur tout le cycle de vie

Production, utilisation, fin de vie

En considérant les impacts sur la chaîne de valeur

Extraction des ressources, transformation, transport, ...

Et typiquement



*Holistique*

En considérant des centaines/milliers de flux environnementaux

Déchets, émissions dans l'air, l'eau, le sol, utilisation des ressources

En considérant plusieurs types d'impact

Santé humaine, écosystèmes, ressources naturelles



*Multicritère*

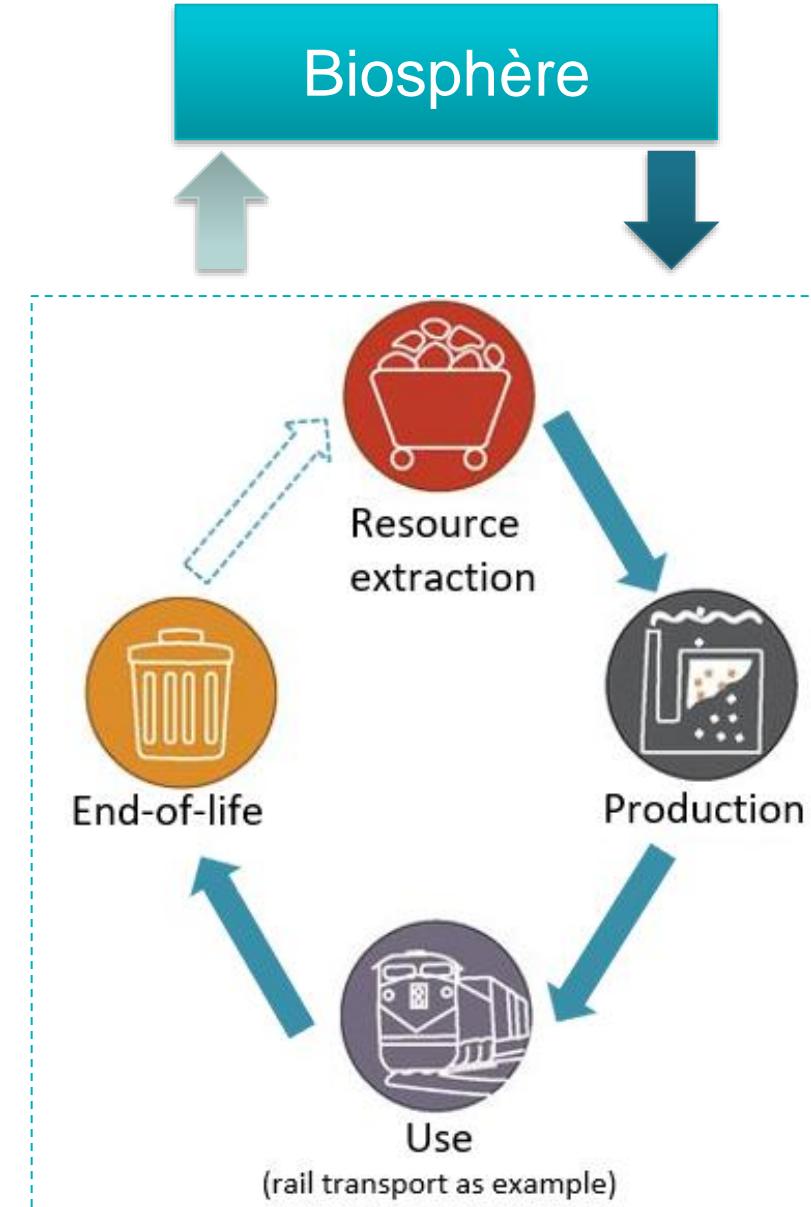


Figure: adapté de Hellweg & Mila i Canals (2014)

# POURQUOI L'ACV?

Besoin urgent et général d'appuyer la prise de décision avec des informations complètes, précises et détaillées sur les impacts environnementaux des produits, des technologies, des organisations et des modes de vie

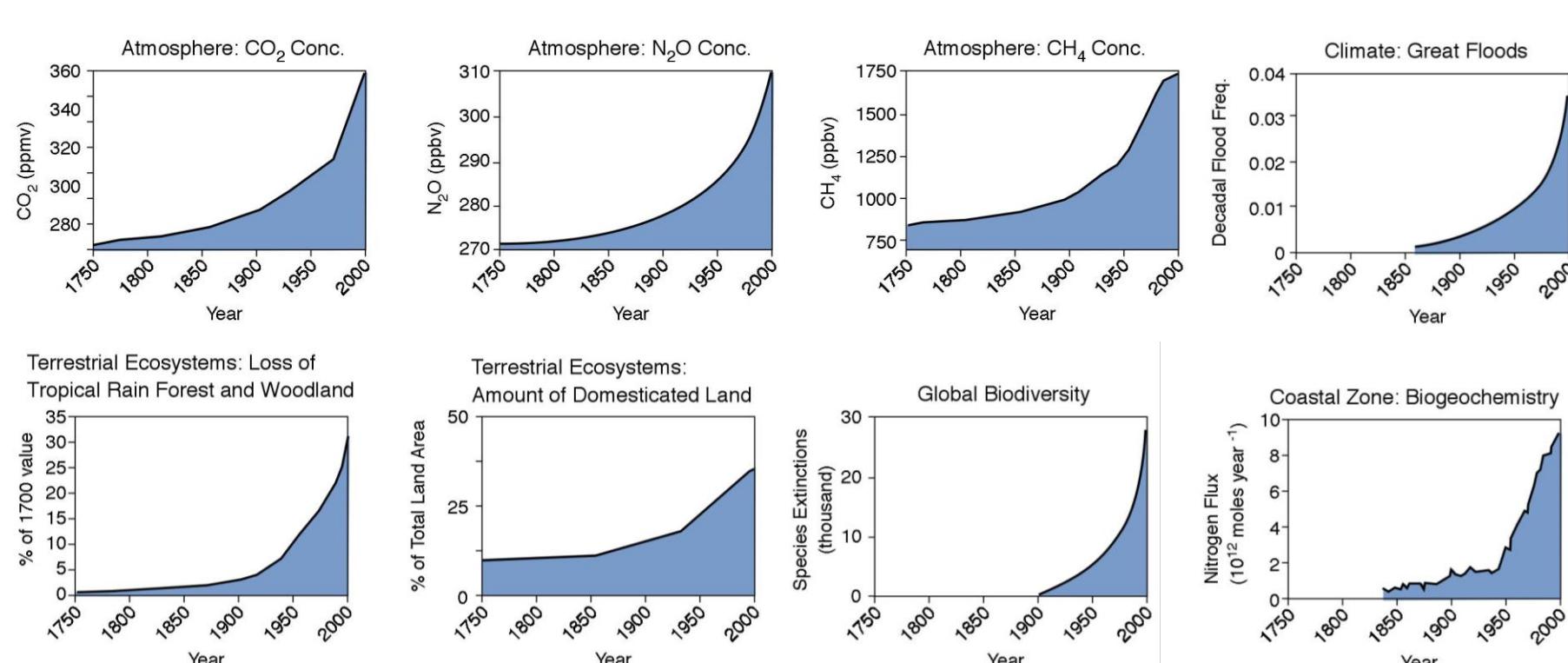


Figure: Steffen et al. 2004

# POURQUOI L'ACV?

## Transfert de pollution le long de la chaîne de valeur

“Les véhicules électriques n’émettent aucune pollution” – ou bien ?



Vraiment zéro émission ?



# POURQUOI L'ACV?

## Transfert de pollution d'un type d'impact à un autre

Équiper des centrales à charbon de dispositifs de captage du CO<sub>2</sub> permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, mais a tendance à augmenter les autres impacts (toxicité, eutrophisation)



Images: Wikipedia

# PREMIERS EXEMPLES D'ACV

## 1969 : l'étude Coca-Cola

### Aide à la décision, questions:

« Quel type d'emballage ? »,  
« Devrions-nous le faire nous-mêmes ? »

### Indicateurs

Cumul d'énergie  
Demande matérielle  
(pas encore de comptabilité carbone !)

Resté confidentiel...

The idea of the complexity of environmental issues was likely first realized by the scientific community in the 1960s. However, the formal analytical scheme that was to become LCA was first conceived by Harry E. TEASLEY, Jr. in 1969. At that time, he was managing the packaging function for The Coca-Cola Company. Over a period of many months he visualized a study that would attempt to quantify the energy, material and environmental consequences of the entire life cycle of a package from the extraction of raw materials to disposal. At that time, The Coca-Cola Company was considering whether they should self-manu-

# PREMIERS EXEMPLES D'ACV

## 1974: Comparaison entre contenants en verre et en plastique pour le lait

### Méthodes et données

Inventaire détaillé des flux d'énergie et de matériaux nécessaires à la fabrication d'emballages

Considérations sur la durée de vie

### Résultats

Le plastique est plus intéressant que le verre (énergétiquement) seulement si on peut assurer plus de 50 réutilisations

*Eighth Paper (ii)*

### RESOURCE IMPLICATIONS WITH PARTICULAR REFERENCE TO ENERGY REQUIREMENTS FOR GLASS AND PLASTICS MILK BOTTLES

BY I. BOUSTEAD

Faculty of Technology, The Open University, Milton Keynes

energy of about 21.5 MJ. Such an enormous starting energy cannot make it more efficient than the glass bottle with a trippage of 25. So why is it on the market? To answer this in energy terms, it is necessary to look at the nature of the trippage figures for glass. If we were to assume that a glass bottle were lost from service only when it was broken or liable to break, then it is necessary to replace a glass bottle every 25 trips. Plotting out the figures of energy versus the number of pints delivered the graph is as shown in Fig. 5 and the plastics returnable would have to survive 75 pints or 50 trips to become energetically favourable. Now this is based on the assumption that the loss of glass bottles is due to breakage or potential breakage. In fact this is only one cause and it would appear that many glass bottles vanish from service for a variety of other reasons. Thus, although the manufacturers of the return-

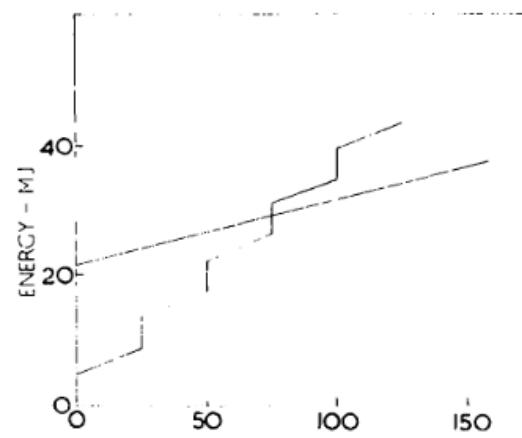


Fig. 5



# HISTOIRE RAPIDE DE L'ACV

1970s

- Problèmes liés aux déchets, à l'assainissement des sites et au recyclage : **approches en bout de chaîne (NIMBY)**
- Approche site**, malgré quelques ACVs "produit"
- Absence d'une vision holistique** : typiquement quantité d'énergie d'un site
- Focus sur seulement quelques polluants**, calculs de *quantités* (au lieu de calculer les *effets*)

1973 : Crise pétrolière

1980s

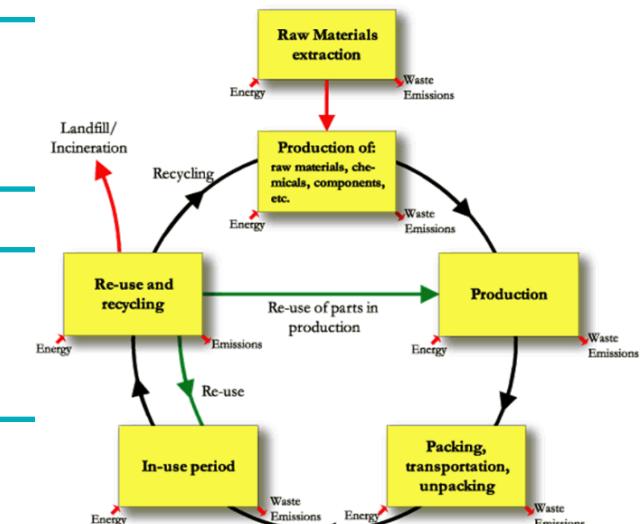
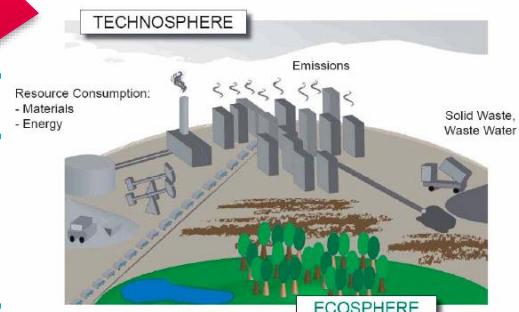
- Transition lente de l'*approche site* à l'*approche produit*
- Gestion de l'énergie, des matières premières, et des polluants
- Absence d'une vision holistique** : accent limité sur la chaîne d'approvisionnement et le traitement en fin de vie
- Focus sur seulement quelques polluants**, quelques effets calculés, sans être exhaustif

1990s

- Les normes de gestion de l'environnement apparaissent (ISO 14001 and EMAS)
- Réflexion sur le cycle de vie, « vraie » approche produit
- Perspective **cradle-to-grave**, et discussions sur l'écoconception

2010s

- Développement de bases de données, ACV couplée à d'autres techniques, évaluations **à l'échelle du système...**
- Les **méthodologies d'évaluation d'impact** atteignent un consensus (notamment sur la toxicité)
- Techniques plus gourmandes en calcul (bases de données plus volumineuses, séries temporelles, évaluation dynamique...)



## Dans les politiques publiques

Certains règlements/directives recommandent ou exigent l'utilisation de l'ACV. Par exemple:

- Norme californienne sur les carburants à faible teneur en carbone ([LINK](#))
- Directive de l'UE sur les produits liés à l'énergie (2009/125/CE) ([LINK](#))
- Directive-cadre de l'UE sur les déchets (2008/98/CE)
- Proposition de l'UE relative à un cadre visant à faciliter l'investissement durable (COM/2018/353 final) ([LINK](#))
- Acte délégué de l'UE sur l'hydrogène ([LINK](#))
- Décret ministériel français sur le score environnemental des véhicules électriques
- ...

Programme, aims to reduce the environmental impacts of products across the whole of their life cycle, including in the selection and use of raw materials, in manufacturing, packaging, transport and distribution, installation and maintenance, use and end-of-life. Considering at the design stage a product's environmental impact throughout its whole life cycle has a high potential to facilitate improved environmental performance in a cost-effective way, including in terms of resource and material efficiency, and thereby to contribute to achieving the objectives of the Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources. There should be sufficient flexibility to enable this factor to be integrated in product design whilst taking account of

### RÈGLEMENT DÉLÉGUÉ (UE) 2023/1185 DE LA COMMISSION

du 10 février 2023

complétant la directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil en établissant un seuil minimal de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les carburants à base de carbone recyclé et en précisant la méthode d'évaluation des réductions des émissions de gaz à effet de serre réalisées grâce aux carburants liquides et gazeux renouvelables destinés aux transports, d'origine non biologique, et aux carburants à base de carbone recyclé

LA COMMISSION EUROPÉENNE,

vu le traité sur le fonctionnement de l'Union européenne,

vu la directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables ([1](#)), et notamment son article 25, paragraphe 2, et son article 28, paragraphe 5, considérant ce qui suit:

- (1) Compte tenu, d'une part, de la nécessité de réduire de manière substantielle les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports et du fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre que l'application des techniques de captage et de stockage du carbone, parmi d'autres mesures, représente pour chaque carburant, et, d'autre part, des exigences en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixées pour les autres carburants dans la directive (UE) 2018/2001, il convient de fixer un seuil minimal de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 70 % pour tous les types de carburants à base de carbone recyclé.
- (2) Il convient d'établir des règles claires, fondées sur des critères objectifs et non discriminatoires, aux fins du calcul des réductions des émissions de gaz à effet de serre réalisées grâce aux carburants liquides et gazeux renouvelables destinés au secteur des transports, d'origine non biologique, et aux carburants à base de carbone recyclé, ainsi qu'à leurs combustibles fossiles de référence.
- (3) La méthode de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre devrait tenir compte des émissions tout au long du cycle de vie issues de la production des carburants liquides et gazeux renouvelables destinés au secteur des transports, d'origine non biologique, et des carburants à base de carbone recyclé, et se fonder sur des critères objectifs et non discriminatoires.
- (4) Il convient de ne pas accorder de crédits pour le captage du CO<sub>2</sub> déjà couvert par d'autres dispositions du droit de l'Union. Par conséquent, lors de la détermination des émissions résultant de l'utilisation ou de la destination existantes des intrants, cette catégorie de CO<sub>2</sub> capté ne devrait pas être considérée comme n'ayant pas été émise.

L'ACV est encore loin d'être obligatoire pour les produits vendus dans l'UE !

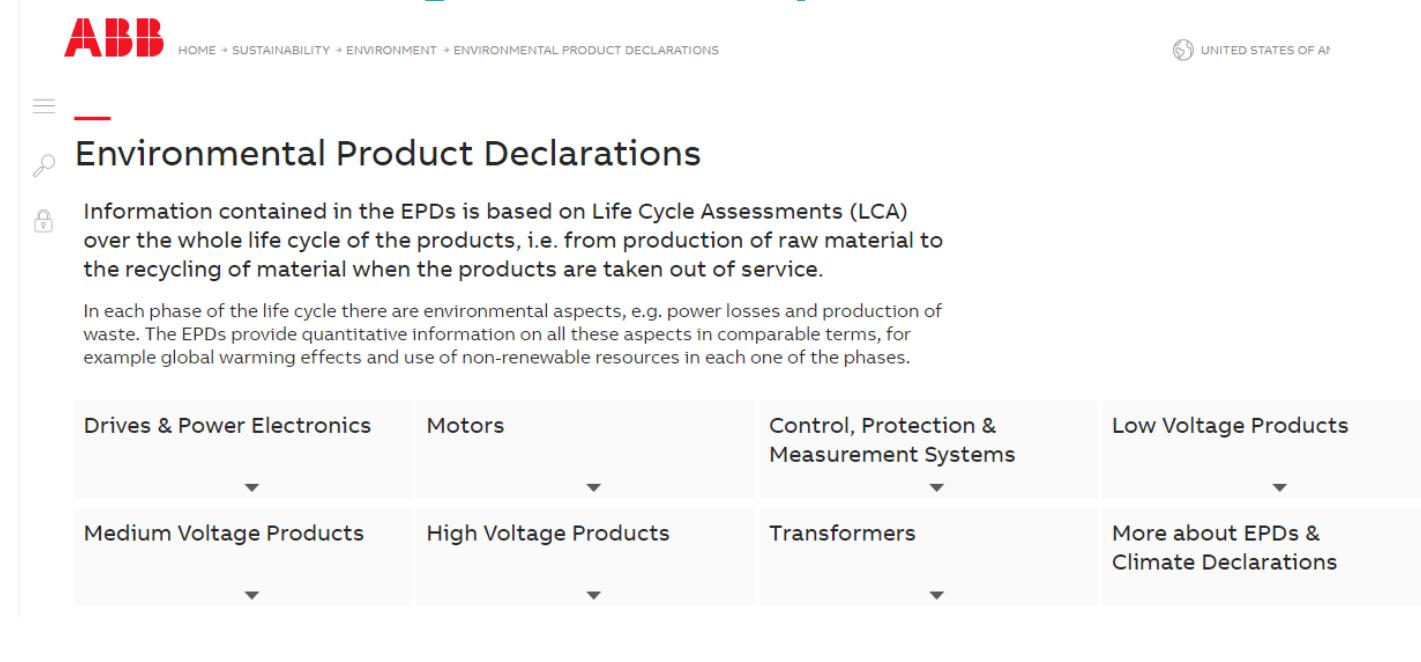
# UTILISATION DE L'ACV

## Fiches de déclaration environnementales et sanitaires (FDES)

### En anglais “EPD” (*environmental product declaration*)

Informer les utilisateurs sur la performance environnementale des matériaux et produits industriels ou de grande consommation

### De nombreuses grandes entreprises ont mis en œuvre les EPDs



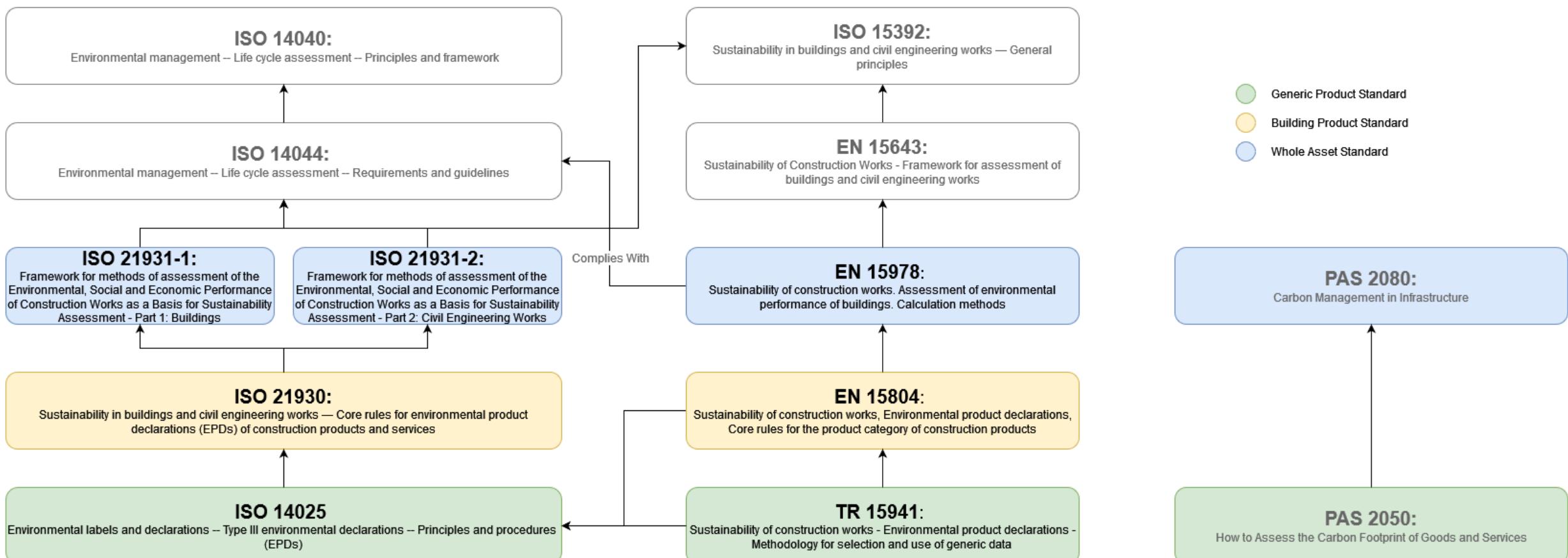
The screenshot shows the ABB website's Environmental Product Declarations section. At the top, there is a navigation bar with links for HOME, SUSTAINABILITY, ENVIRONMENT, and ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATIONS. Below this, a search icon and a menu icon are visible. The main content area has a heading "Environmental Product Declarations". Underneath, there is a paragraph explaining that EPDs are based on Life Cycle Assessments (LCA) over the whole life cycle of products. Another paragraph discusses how EPDs provide quantitative information on environmental aspects like power losses and waste across different phases of the life cycle. At the bottom, there is a grid of categories: Drives & Power Electronics, Motors, Control, Protection & Measurement Systems, Low Voltage Products, Medium Voltage Products, High Voltage Products, Transformers, and More about EPDs & Climate Declarations.

<https://new.abb.com/us/sustainability/environment/environmental-product-declarations>

# UTILISATION DE L'ACV

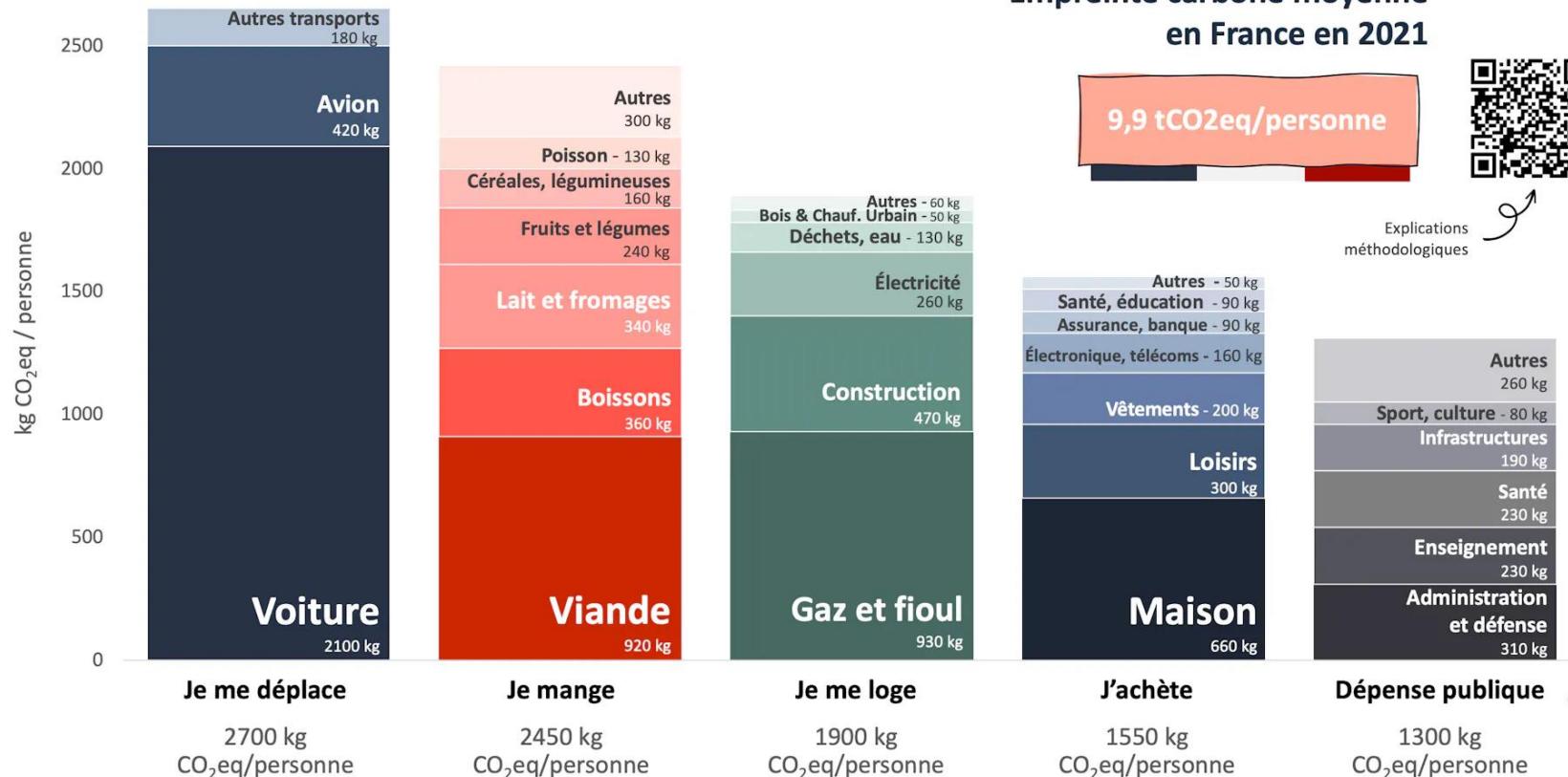
## Fiches de déclaration environnementales et sanitaires

Une “jungle” de normes et standards, qui reposent tous sur la série ISO 14040



# UTILISATION DE L'ACV

## Empreinte carbone individuelle



### Empreinte carbone moyenne en France en 2021

9,9 tCO<sub>2</sub>eq/personne

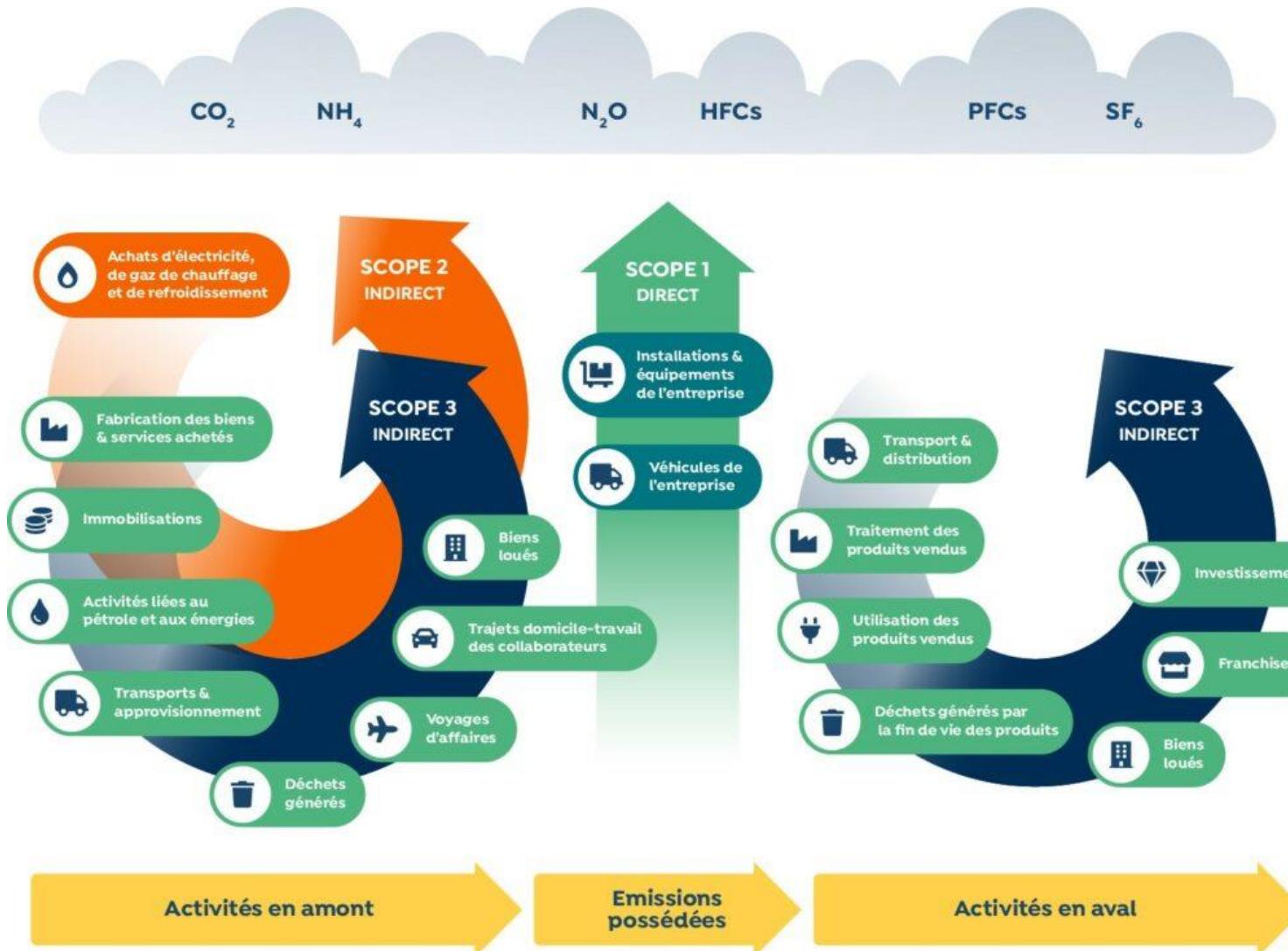


Explications méthodologiques



# UTILISATION DE L'ACV

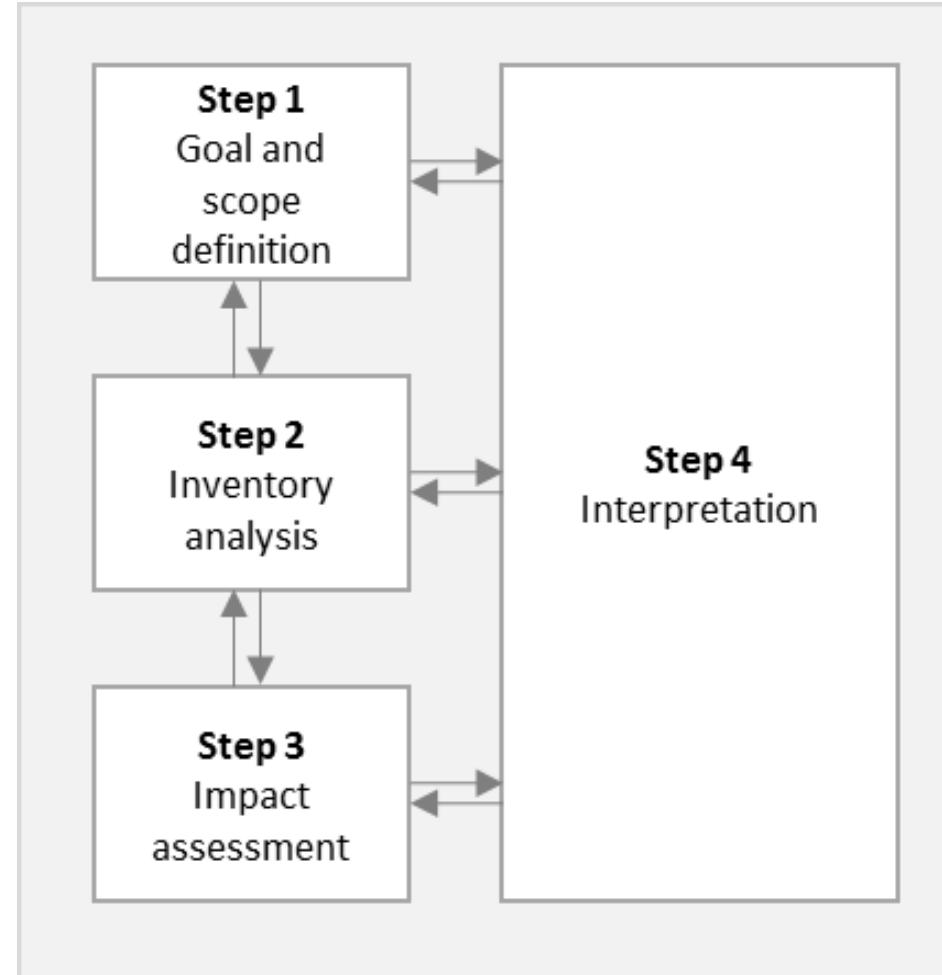
## Bilan carbone d'une entreprise



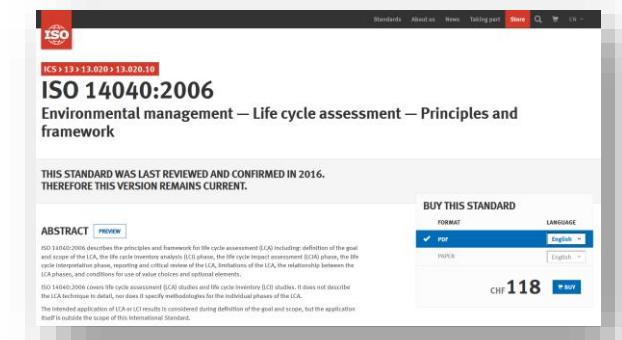
# 02 | PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ACV

# L'ACV EST UN PROCESSUS ITÉRATIF

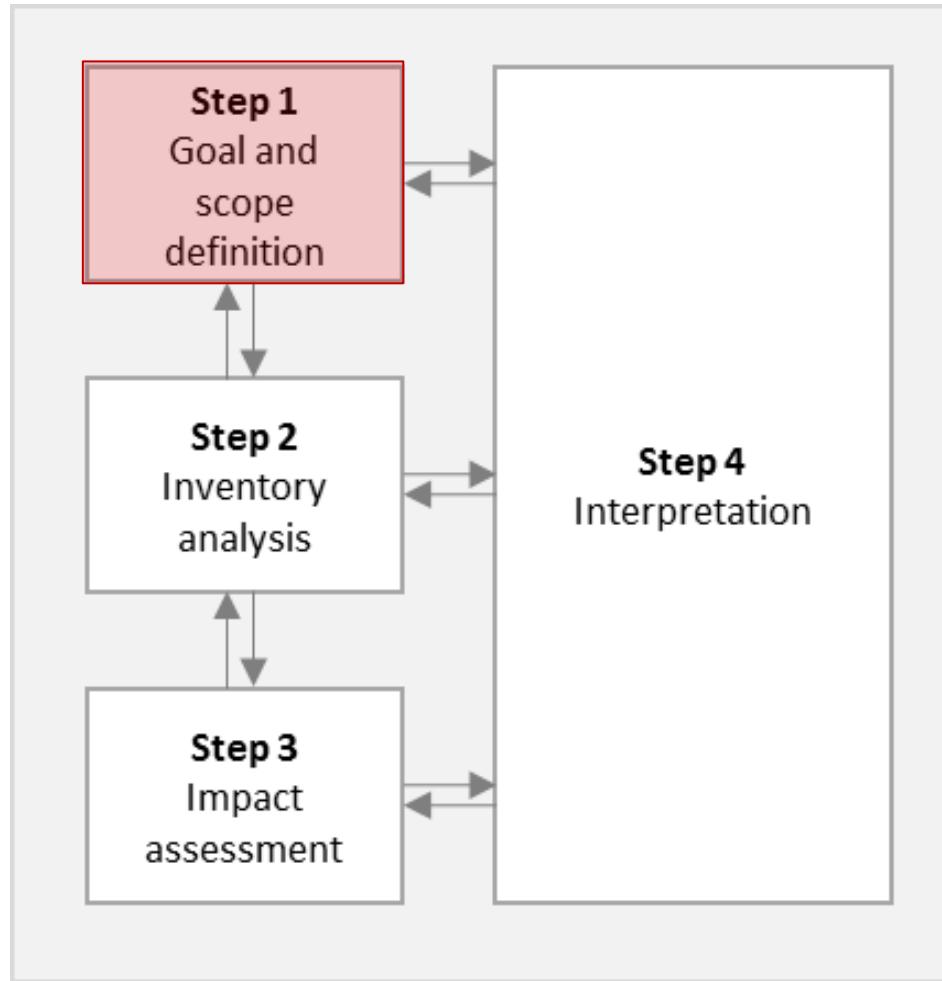
4 phases



Comme décrit dans ISO14040:2006



# PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION



# PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION

## “Goal and scope”

**La définition de l'objectif doit indiquer sans ambiguïté :**

Les raisons de la réalisation de l'étude

L'application prévue

Le public visé

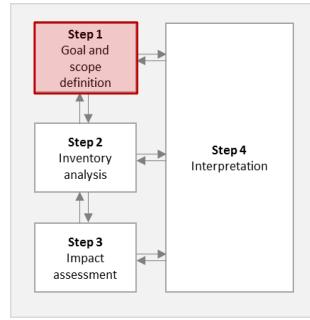
**La définition du champ d'application doit couvrir :**

Le produit à étudier

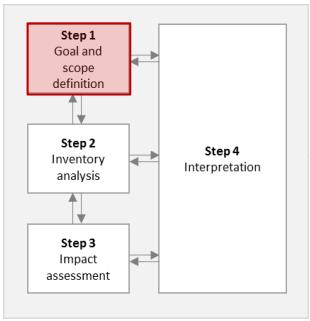
L'« unité fonctionnelle »

Les types d'impact sur l'environnement à étudier

Limites du système (peut être en relation avec des systèmes techniques, des frontières géographiques, du temps, etc.)



# PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION



## L'unité fonctionnelle

**Une unité de référence pour l'évaluation et la comparaison entre les alternatives**

Doit saisir la « fonction » du ou des produits à l'étude

**Par exemple, pour la peinture en bâtiment**

« L'unité fonctionnelle consiste à protéger un mur extérieur de maison en bois à Oléron pour une durée de 10 ans »

**Ou, pour l'électricité**

« L'unité fonctionnelle est 1 kWh d'électricité produite par une centrale hydroélectrique »

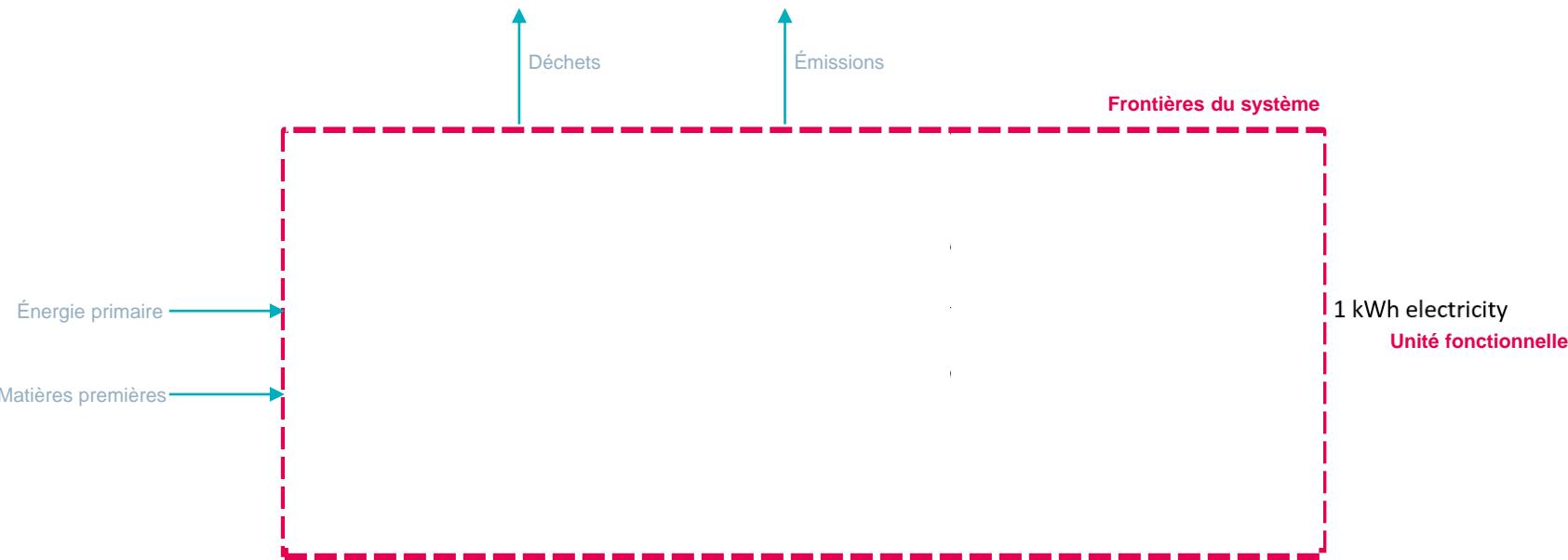
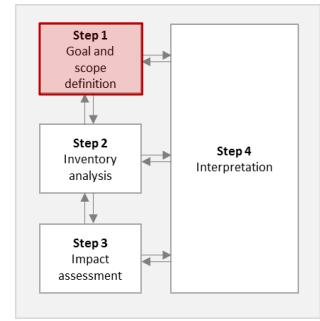
« L'unité fonctionnelle est 1 kWh d'électricité fournie à un consommateur français »

**Le choix de l'unité fonctionnelle n'est pas anodin, car les produits comparés ne présentent parfois pas exactement la même fonction**

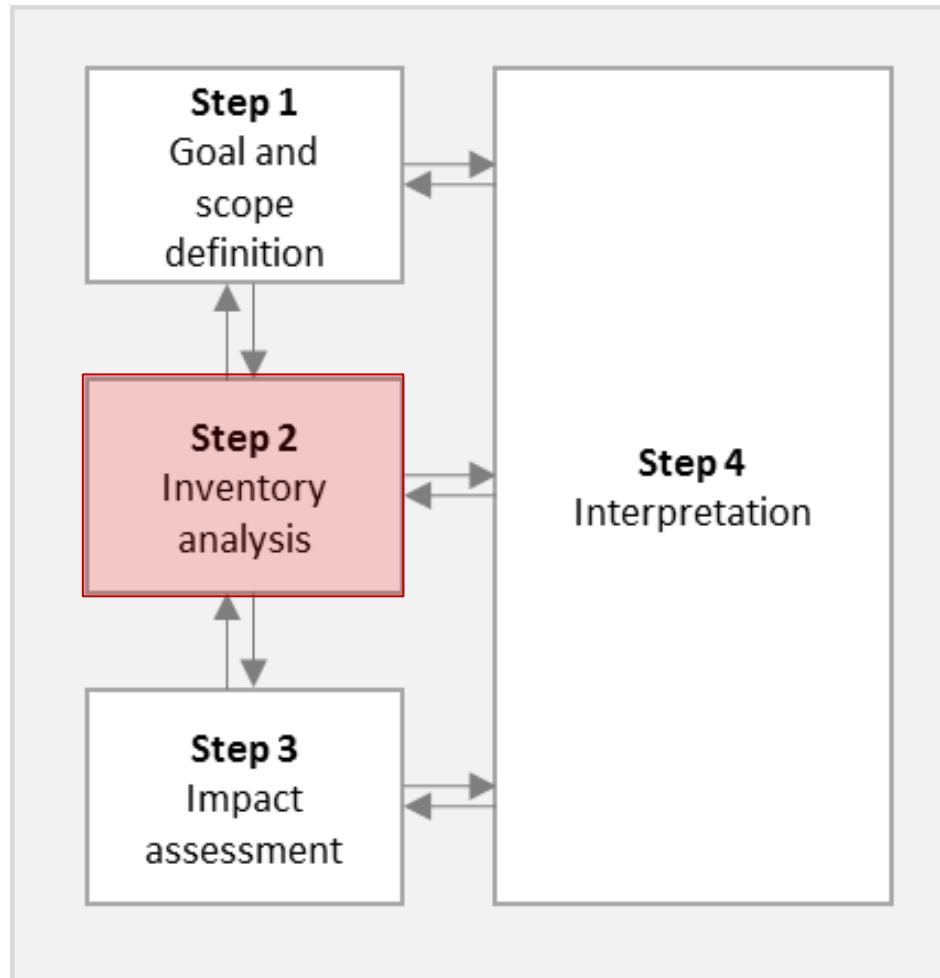


# PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION

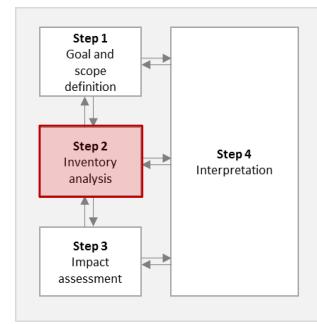
## Les frontières du système



# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE



# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE



## Collecte de données

### Objectif

Produire une “cartographie” de toutes les activités associées à la production, à l’opération, et à la fin de vie du produit ou du service, conventionnellement:

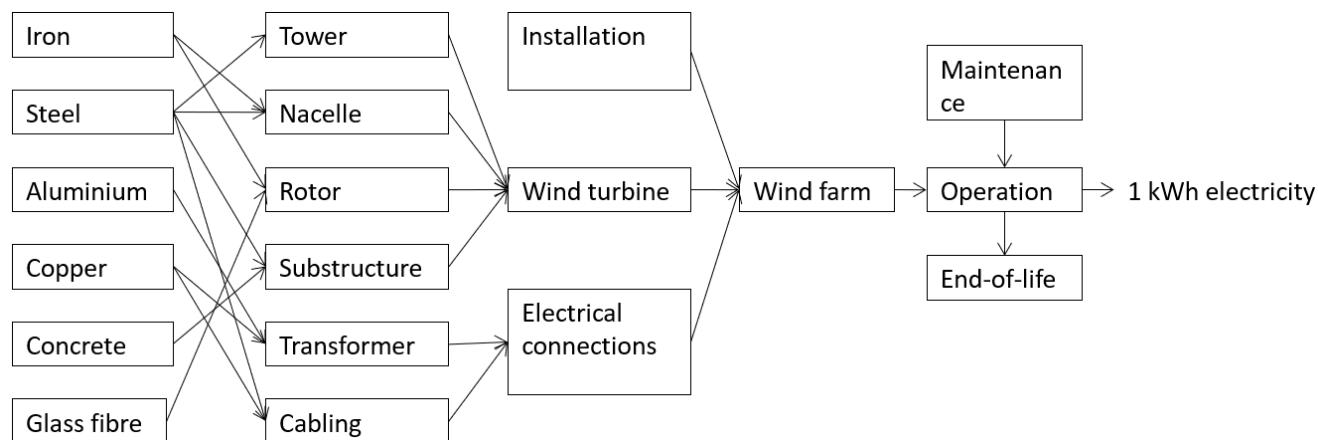
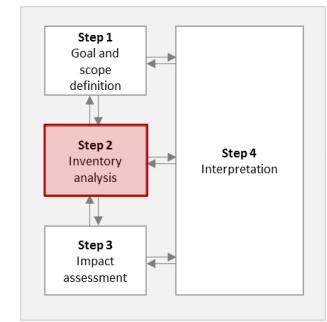
1. Construire un *diagramme*
2. Obtenir les données *quantifiées*
3. *Formater* ces données sur une base commune

Les données peuvent provenir de mesures, de données de production (documentation machines, ...), de bases de données d’ACV, de la littérature scientifique, ou de jugement d’expert

Idéalement, l’incertitude est également quantifiée

# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

## Collecte de données



**Table S3.** Breakdown of components and materials of one wind turbine

Component	Sub-component	Material	Quantity
Rotor	Blades	Glass-reinforced plastics	53 t
	Hub w/nose cone	Cast iron	35 t
	Low-alloy steel	21 t	
	Glass-reinforced plastics	1.4 t	
	Copper	10 t	
	Electrical steel	23 t	
Nacelle	Generator	Cast iron	42 t
	Gearbox	High-alloy steel	42 t
	Housing	Glass-reinforced plastics	10 t
	Main frame	Cast iron	35 t
	Main shaft	Low-alloy steel	19 t
	Transformer	High-alloy steel	27 t
Tower	Transformer	Low-alloy steel	4.8 t
	Tubular steel	Copper	7.8 t
	Tower internals	Electrical steel	18 t
	Tower internals	Low-alloy steel	350 t
		Aluminum	2.6 t
		Copper	1.3 t

Table: Arvesen et al.  
2013

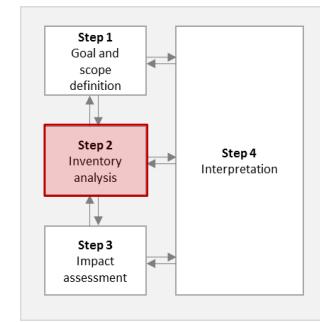
# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

## Calcul d'inventaire

### Objectif

L'étape du calcul d'inventaire consiste à agréger les émissions et ressources brutes de toutes les activités comprises dans les frontières du système

La liste ainsi obtenue peut contenir des centaines ou des milliers de substances et matériaux, émis ou requis à toute étape du cycle de vie, mis à l'échelle de l'unité fonctionnelle, ici 1 kWh

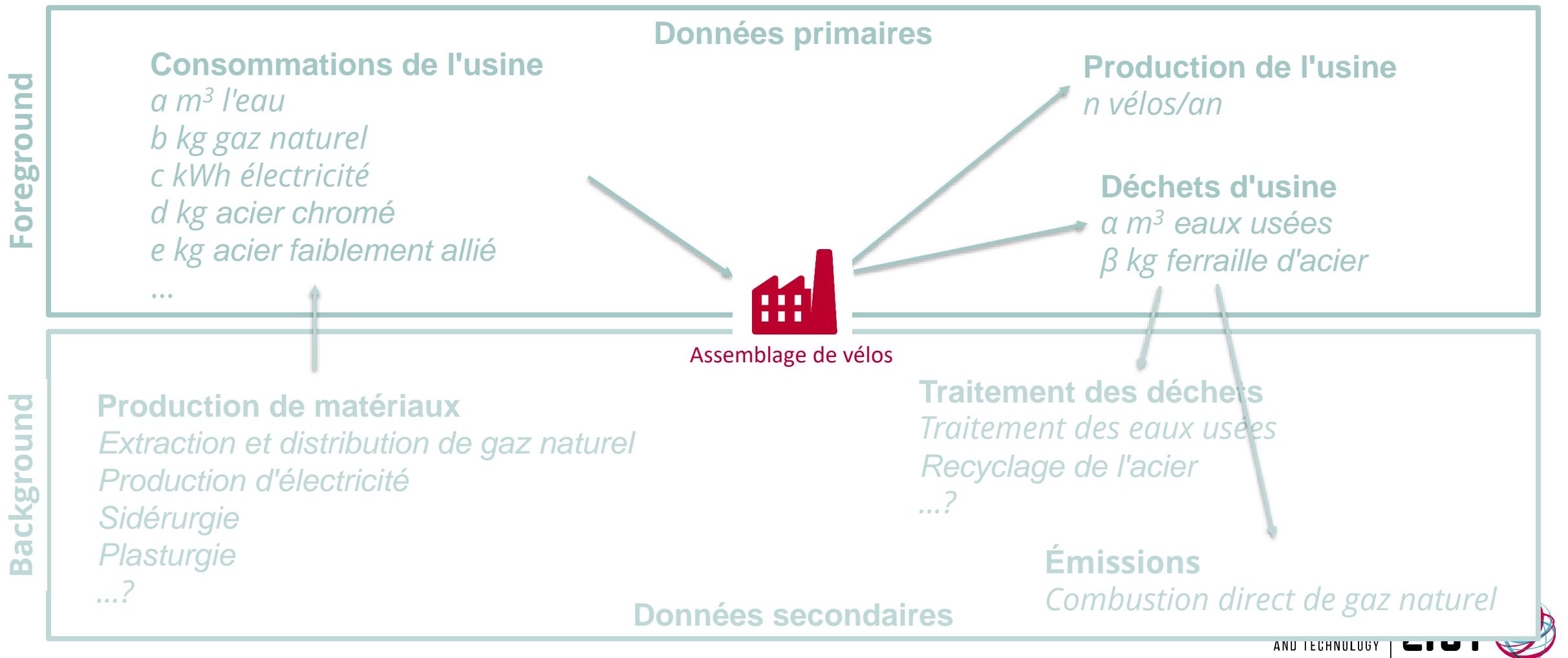


per 1 MWh		Windpower
(a) Benzo(a)pyrene	kg	1.1 E-6
(a) CO	kg	3.4 E-1
(a) CO2	kg	4.0 E+1
(a) Hg	kg	2.2 E-6
(a) Methan	kg	1.5 E-1
(a) NMVOC	kg	8.0 E-2
(a) Nox	kg	1.1 E-1
(a) PAH	kg	1.7 E-4
(a) particulate matter	kg	1.1 E-1
(a) SO2	kg	1.5 E-1

Table: Arvesen et al. 2013

# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

## Données primaires vs. données secondaires



# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

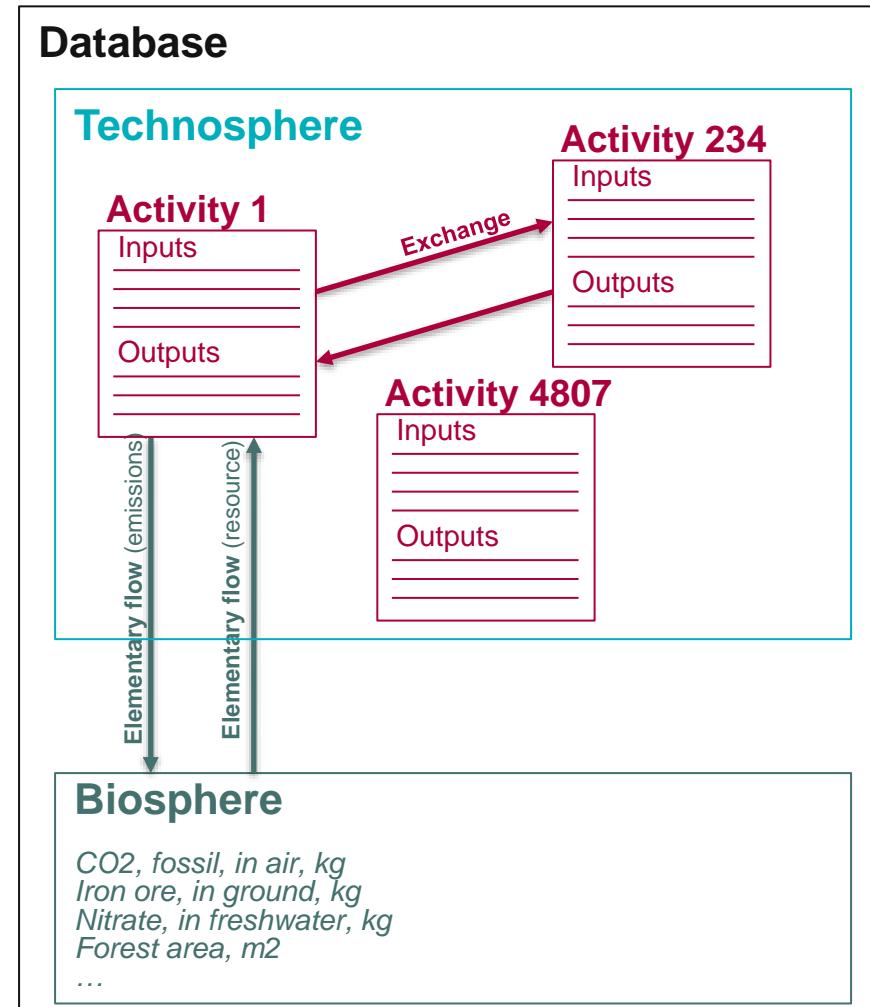
## Bases de données

Il n'est pas réaliste d'aller collecter les données de production en amont pour tous les matériaux et vecteurs énergétiques, il faut s'appuyer sur des **bases de données** existantes

**En général, une base de données contient des “activités”, liées...**

...entre elles, pour composer la **“technosphère”** (exchanges), or

...avec l'environnement, pour composer la **“biosphère”** (elementary flows)



Equivalent in  
LCA algebra

A

B

# PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

## Bases de données – liste non exhaustive



**Name:** ecoinvent  
**Provider:** ecoinvent centre (CH)



**Name:** GaBi  
**Provider:** Sphera (ex-Thinkstep, DE)



**Name:** Agribalyse  
**Provider:** ADEME (French EPA)



**Name:** Environmental Footprint database  
**Provider:** European Commission



**Name:** World Food LCA database  
**Provider:** Quantis (CH)



**Name:** Global LCA data access (GLAD)\*  
**Provider:** UNEP Life Cycle Initiative



**Name:** Inventory Database for Environmental Analysis (IDEA)  
**Provider:** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (JP)



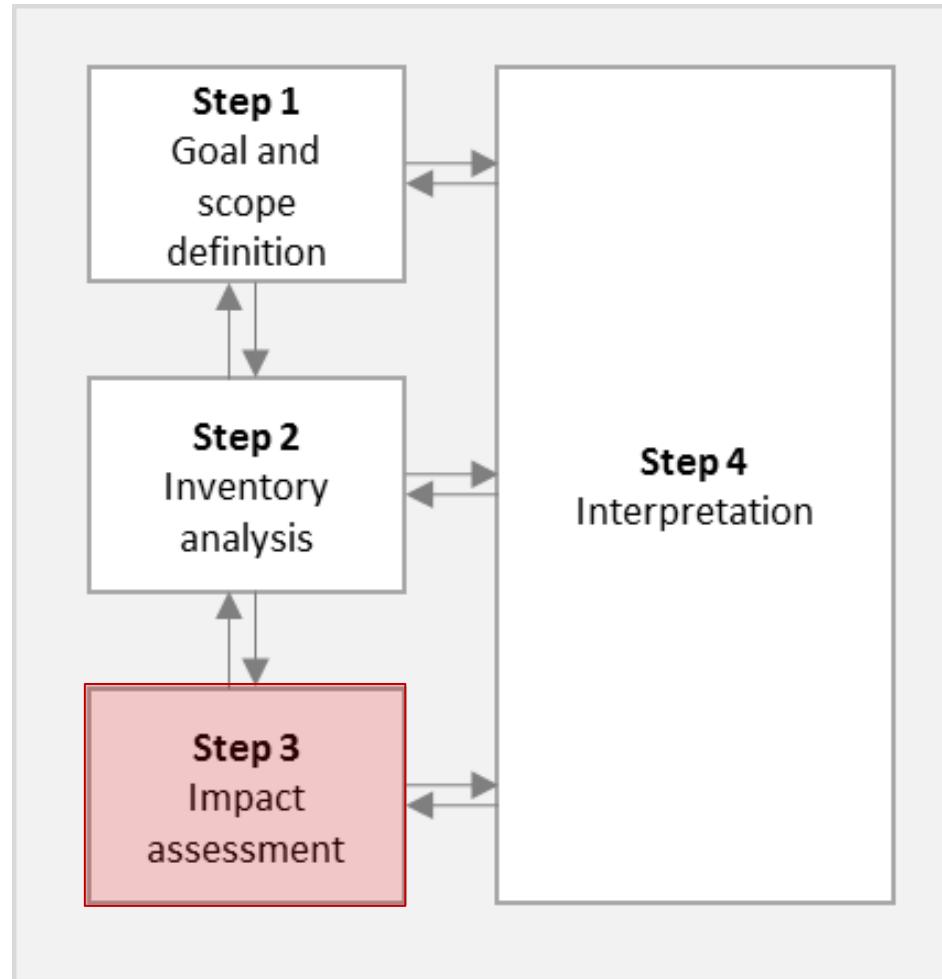
**Name:** US LCI database  
**Provider:** National Renewable Energy Laboratory (NREL, US)



**Name:** Big Open Network for Sustainability Assessment Information (BONSAI)\*  
**Provider:** BONSAI association (DK)

\*database aggregators

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT



# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

## Caractériser les impacts

### Objectif

La liste de substances issue de l'analyse d'inventaire n'offre que peu d'information quant aux impacts environnementaux du produit ou du service, il faut caractériser ces impacts



La caractérisation **pondère** et **agrège** les substances par catégorie d'impact, chacune étant associée à un **indicateur environnemental**



Catégorie d'impact	Indicateur environnemental	Unité	Exemple de substances
Changement climatique	Pouvoir de réchauffement global (100 ans)	kg CO <sub>2</sub> eq.	
Écotoxicité en eau douce	Unité de toxicité comparative (CTU) pour les écosystèmes	CTUe	
Eutrophisation en eau douce	Fraction phosphate	kg P	
Ressources minérales et métalliques	Potentiel de déplétion abiotique	kg Sb eq.	
Émissions de particules	Incidence de maladies	disease incidence	Pouvez-vous nommer des substances de cette colonne ?

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPS as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van	II

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change - biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion resistance</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> water</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) <sup>26</sup>	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

36  
 This JRC technical report is a working document and does not modify Recommendation 2013/179/EU on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPs as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health disease incidence	Air pollution	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	Air pollution	LOTOs-EUROS model (Van	II

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change - biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion resistance</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> water</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) <sup>26</sup>	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elpla.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPS as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van	II

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change - biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion resistance</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> water</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) <sup>26</sup>	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPS as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van	II

## Radiation

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change - biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion resistance</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> water</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

36  
This JRC technical report is a working document and does not modify Recommendation 2013/179/EU on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) <sup>26</sup>	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPS as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van	II

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change – biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion resistance</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> water</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

## Eutrophication

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil) <sup>26</sup>	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

36  
 This JRC technical report is a working document and does not modify Recommendation 2013/179/EU on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

**Table 2** EF impact categories with respective impact category indicators and characterization models. The CFs that shall be used are available at:  
<http://elca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>.

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robust -ness
Climate change, total <sup>23</sup>	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPS as in (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U <sup>235</sup>	kBq U <sup>235</sup> eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van	II

<sup>23</sup> The indicator "Climate Change, total" is constituted by three sub-indicators: Climate Change, fossil; Climate Change, biogenic; Climate Change, land use and land use change. The sub-indicators are further described in section 4.4.10. The sub-categories 'Climate change -fossil', 'Climate change - biogenic' and 'Climate change - land use and land use change', shall be reported separately if they show a contribution of more than 5% each to the total score of climate change.

formation, human health			Zel'm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008	
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al., 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Fankte et al, 2017)	III
Land use	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soil quality index<sup>24</sup></li> <li>• Biotic production</li> <li>• Erosion</li> <li>• Mechanical filtration</li> <li>• Groundwater replenishment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionless (pt)</li> <li>• kg biotic production</li> <li>• kg soil</li> <li>• m<sup>3</sup> groundwater</li> </ul>	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

## Resources (land)

Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m <sup>3</sup> world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use <sup>25</sup> , minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Further information on impact assessment calculations is provided in Chapter 5.



JRC TECHNICAL REPORTS

Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method

Zampori L, Pant R

2019



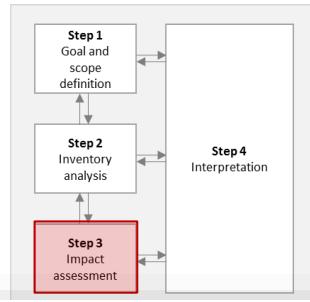
INSTIT  
A

<sup>24</sup> This index is the result of the aggregation, performed by JRC, of the 4 indicators provided by LANCA model as indicators for land use.

36  
This JRC technical report is a working document and does not modify Recommendation 2013/179/EU on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

## Exemples de facteurs de caractérisation



### Method: EF v3.0 - material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)

Hide uncertainty columns  Edit Characterization Factors

	Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
29	Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.09e-09	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
100	Aluminium, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.09e-09	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
109	Antimony, in ground	('natural resource', 'in ground')	1	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
81	Arsenic, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00297	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
2	Barium, in ground	('natural resource', 'in ground')	6.04e-06	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
80	Beryllium, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.26e-05	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
120	Bismuth, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.0411	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
103	Borax, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00048415	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
39	Boron, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00427	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
138	Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.157	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
60	Cadmium, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.157	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
83	Carnallite	('natural resource', 'in water')	1.0375e-05	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
118	Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.000443	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
76	Chromium, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.000443	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
19	Chrysotile, in ground	('natural resource', 'in ground')	5.3436e-10	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
40	Cobalt, Co 5.0E-2%, in mixed ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.57e-05	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
114	Cobalt, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.57e-05	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
133	Colemanite, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00067372	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
64	Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
51	Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
8	Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
111	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
85	Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
112	Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
16	Copper, 1.25% in sulfide, Cu 0.24% and Zn 0.1% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
124	Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
10	Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
35	Copper, Cu 0.2%, in mixed ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
52	Copper, Cu 0.38%, in mixed ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
91	Copper, Cu 6.8E-1%, in mixed ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
59	Copper, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
99	Cu, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
18	Cu, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	0.00137	kilogram	Undefined or unknown uncertainty

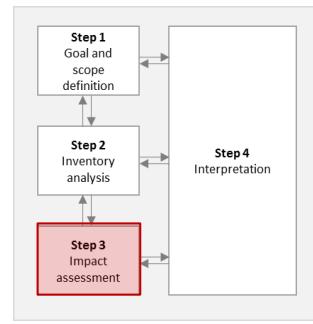
### Method: EF v3.0 - climate change - global warming potential (GWP100)

Hide uncertainty columns  Edit Characterization Factors

	Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
0	Carbon monoxide, from soil or biomass stock	('air', 'indoor')	1.57	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
1	Dinitrogen monoxide	('air', 'non-urban air or from high stacks')	298	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
2	Methane, tetrachloro-, R-10	('air', 'non-urban air or from high stacks')	2020	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
3	Carbon monoxide, from soil or biomass stock	('air', 'low population density, long-term')	1.57	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
4	Methane, bromo-, Halon 1001	('air', 'non-urban air or from high stacks')	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
5	Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HFC-143a	('air', 'urban air close to ground')	5510	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
6	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	('air', 'urban air close to ground')	2070	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
7	Methyl acetate	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
8	Methane, monochloro-, R-40	('air', 'urban air close to ground')	15	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
9	Methyl acetate	('air', 'urban air close to ground')	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
10	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	('air', 'non-urban air or from high stacks')	11500	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
11	Methane, trifluoro-, HFC-23	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	13900	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
12	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2-tetrafluoro-, CFC-114	('air', 'non-urban air or from high stacks')	9620	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
13	Methane, tetrachloro-, R-10	('air',)	2020	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
14	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, HCFC-123	('air', 'urban air close to ground')	96	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
15	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	('air', 'non-urban air or from high stacks')	7150	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
16	Methane, fossil	('air',)	36.8	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
17	Chloroform	('air', 'non-urban air or from high stacks')	20	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
18	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	('air', 'low population density, long-term')	2070	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
19	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	('air', 'non-urban air or from high stacks')	15500	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
20	Methane, bromo-, Halon 1001	('air',)	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
21	Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HFC-143a	('air', 'low population density, long-term')	5510	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
22	Ethane, pentafluoro-, HFC-125	('air',)	3690	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
23	Carbon dioxide, to soil or biomass stock	('soil', 'agricultural')	-1	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
24	Methane, bromo-, Halon 1001	('air', 'urban air close to ground')	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
25	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	635	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
26	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	('air',)	635	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
27	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	('air', 'low population density, long-term')	167	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
28	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	('air',)	7150	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
29	Carbon dioxide, fossil	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	1	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
30	Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2-tetrafluoro-, CFC-114	('air', 'low population density, long-term')	9620	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
31	Methane, from soil or biomass stock	('air', 'non-urban air or from high stacks')	36.8	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
32	Methyl acetate	('air', 'low population density, long-term')	3	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
33	Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	167	kilogram	Undefined or unknown uncertainty
34	Dinitrogen monoxide	('air', 'low population density, long-term')	298	kilogram	Undefined or unknown uncertainty

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

## Chaîne de calcul de l'évaluation



### Activités

Production d'acier  
Laminage  
Production de plastique  
Extrusion  
Transport  
Combustion d'hydrocarbures  
Combustion de biomasse  
Génération d'électricité  
...

### Substances (analyse d'inventaire)

CO<sub>2</sub> to air  
NO<sub>x</sub> to air  
Hg to air  
Hg to water  
Hg to soil  
Land use  
Water use  
Iron ore extracted  
...

### Évaluation d'impact “midpoint”

Particulate matter  
Smog-creation  
Acidification  
Ozone depletion  
Human toxicity  
Ecosystem toxicity  
Water depletion  
Mineral depletion  
...

### Évaluation d'impact “endpoint”

Dommages sur la santé humaine



Dommages sur les écosystèmes



Aménagement des ressources



Pouvez-vous imaginer une étape additionnelle ?

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

## Normalisation et pondération

Comment comparer des impacts fondamentalement différents ?

Exemple : production d'hydrogène

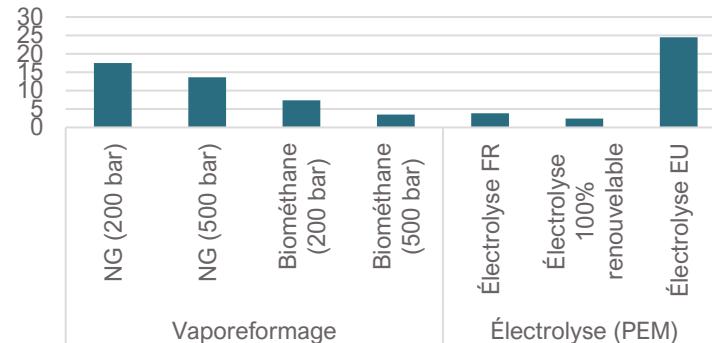
L'électrolyse (production d'hydrogène à partir d'eau) émet moins de CO<sub>2</sub>, mais demande plus de matériaux – comment arbitrer ?

Gaz à effet de serre

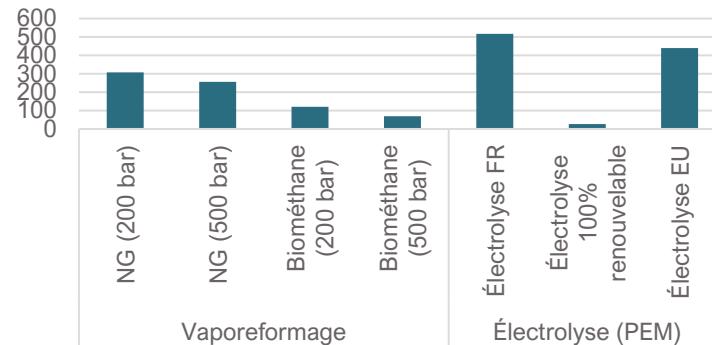
Ressources énergétiques

Ressources minérales et métalliques

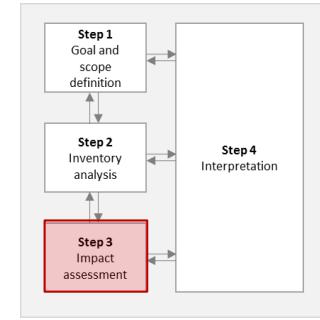
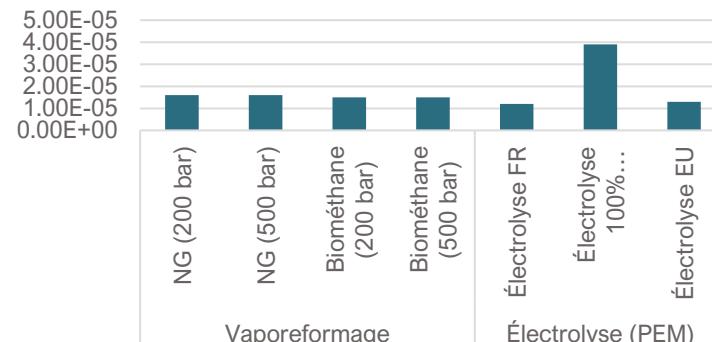
Émissions de gaz à effet de serre de la production d'hydrogène (kg CO<sub>2</sub> eq./kg H<sub>2</sub>)



Ressources énergétiques requises pour la production d'hydrogène (MJ/kg H<sub>2</sub>)



Ressources abiotiques (minéraux, métaux) requises pour la production d'hydrogène (kg Sb eq./kg H<sub>2</sub>)



# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

## Normalisation et pondération

Il est possible de normaliser les résultats par rapport à une référence donnée.

La Commission européenne recommande d'utiliser l'empreinte annuelle d'un citoyen européen moyen.

Une pondération est ensuite nécessaire pour produire un score unique – cette étape est bien plus subjective !

**Table 1.** Global normalisation factors for emissions and resource extraction in 2010, based on EF 2017 method (Sala et al 2017). The attributed score is from I-highest to III-lowest

Impact category	Model	Unit	global NF for EF	global NF for EF per person *	Inventory coverage completeness	Inventory robustness	Recommendation level of EF impact assessment
Climate change	IPCC (2013)	kg CO <sub>2</sub> eq	5.79E+13	8.40E+03	II	I	I
Ozone depletion	WMO (1999)	kg CFC-11 eq	1.61E+08	2.34E-02	III	II	I
Human toxicity, cancer	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)	CTUh	2.66E+05	3.85E-05	III	III	II/III
Human toxicity, non-cancer	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)	CTUh	3.27E+06	4.75E-04	III	III	II/III
Particulate matter	Fantke et al., 2016	disease incidences	4.95E+06 <sup>(a)</sup>	7.18E-04	I/II	I/II	I
Ionising radiation	Frischknecht et al., 2000	kBq U-235 eq.	2.91E+13	4.22E+03	II	III	II
Photochemical ozone formation	Van Zelm et al., 2008 as applied in ReCiPe (2008)	kg NMVOC eq.	2.80E+11	4.06E+01	III	I/II	II
Acidification	Posch et al., 2008	mol H <sup>+</sup> eq	3.83E+11	5.55E+01	II	I/II	II
Eutrophication, terrestrial	Posch et al., 2008	mol N eq	1.22E+12	1.77E+02	II	I/II	II
Eutrophication, freshwater	Struijs et al., 2009	kg P eq	5.06E+09	7.34E-01	II	III	II
Eutrophication, marine	Struijs et al., 2009	kg N eq	1.95E+11	2.83E+01	II	II/III	II
Land use	Bos et al., 2016 (based on)	pt	9.64E+15 <sup>(b)</sup>	1.40E+06	II	II	III
Ecotoxicity freshwater	USEtox (Rosenbaum et al., 2008)	CTUe	8.15E+13	1.18E+04	III	III	II/III
Water use	AWARE 100 (based on; UNEP, 2016)	m <sup>3</sup> water eq of deprived water	7.91E+13 <sup>(b)</sup>	1.15E+04	I	II	III
Resource use, fossils	ADP fossils (van Oers et al., 2002)	MJ	4.50E+14	6.53E+04	I	II	III
Resource use, minerals and metals	ADP ultimate reserve (van Oers et al., 2002)	kg Sb eq	4.39E+08	6.36E-02	I	II	III

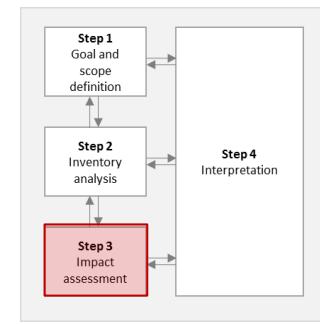
\* World population used to calculate the NF per person: 6895889018 people. Source: UNDESA (2011)

(a) NF calculation takes into account the emission height, in both the inventory and the impact assessment

(b) The NF is built by means of regionalised CFs

	Aggregated weighting set (A)	Robustness factors (B)	Intermediate Coefficients C=A*B	Final weighting factors (incl. robustness)
				C scaled to 100
Climate change	<b>12.90</b>	0.87	<b>11.18</b>	<b>21.06</b>
Ozone depletion	5.58	0.60	3.35	<b>6.31</b>
Human toxicity, cancer effects	6.80	0.17	1.13	<b>2.13</b>
Human toxicity, non-cancer effects	5.88	0.17	0.98	<b>1.84</b>
Particulate matter	5.49	0.87	4.76	<b>8.96</b>
Ionizing radiation, HH	5.70	0.47	2.66	<b>5.01</b>
Photochemical ozone formation, HH	4.76	0.53	2.54	<b>4.78</b>
Acidification	4.94	0.67	3.29	<b>6.20</b>
Eutrophication, terrestrial	2.95	0.67	1.97	<b>3.71</b>
Eutrophication, freshwater	3.19	0.47	1.49	<b>2.80</b>
Eutrophication, marine	2.94	0.53	1.57	<b>2.96</b>
Ecotoxicity freshwater	6.12	0.17	1.02	<b>1.92</b>
Land use	9.04	0.47	4.22	<b>7.94</b>
Water use	9.69	0.47	4.52	<b>8.51</b>
Resource use, mineral and metals	6.68	0.60	4.01	<b>7.55</b>
Resource use, fossils	7.37	0.60	4.42	<b>8.32</b>

# PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT



## Normalisation et pondération

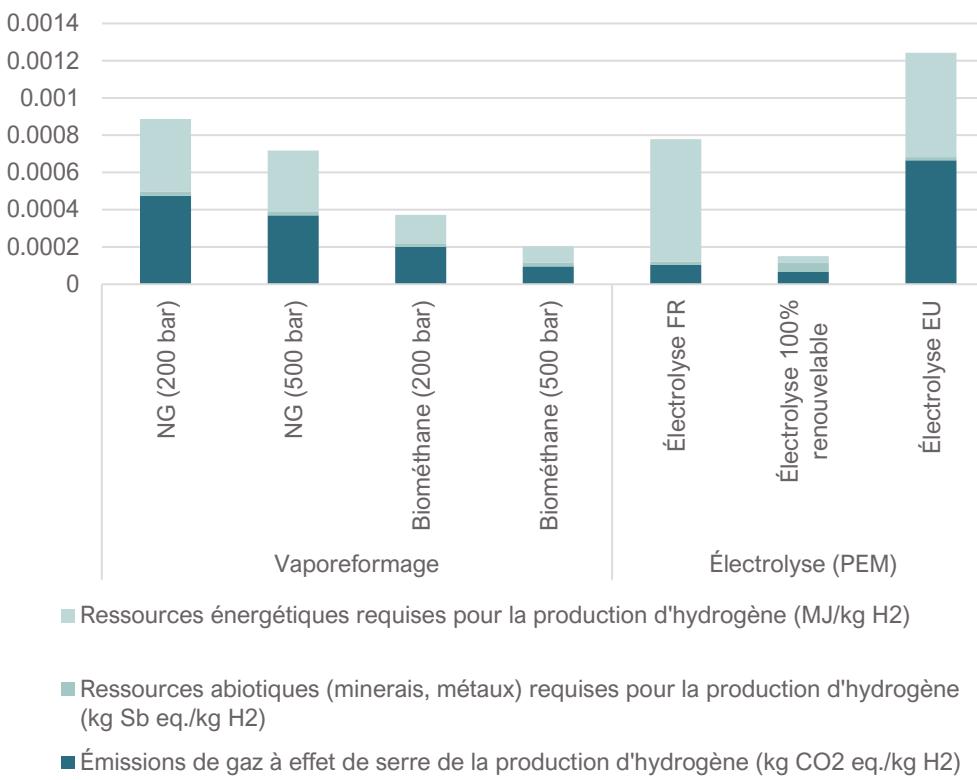
Il est possible de normaliser les résultats par rapport à une référence donnée.

La Commission européenne recommande d'utiliser l'empreinte annuelle d'un citoyen européen moyen.

Une pondération est ensuite nécessaire pour produire un score unique – cette étape est bien plus subjective !



Comparaison de méthodes de production d'hydrogène après normalisation et pondération

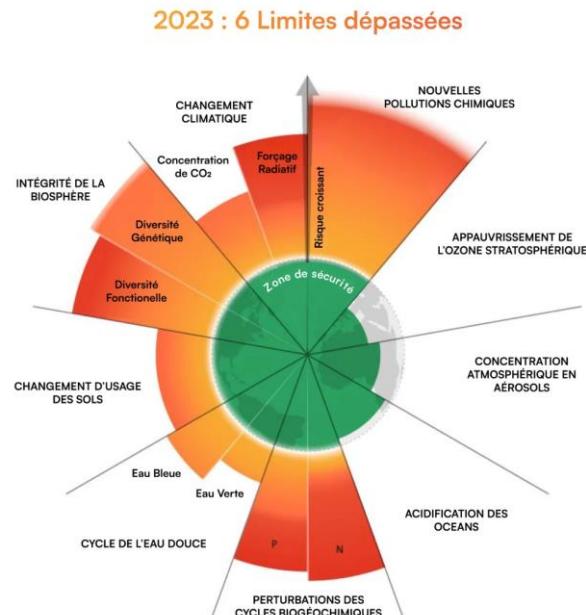


# NORMALISATION ET PONDÉRATION

## Normalisation

Récemment, l'idée de limites planétaires a fait son apparition en ACV. Le concept permet de prioriser les catégories d'impact.

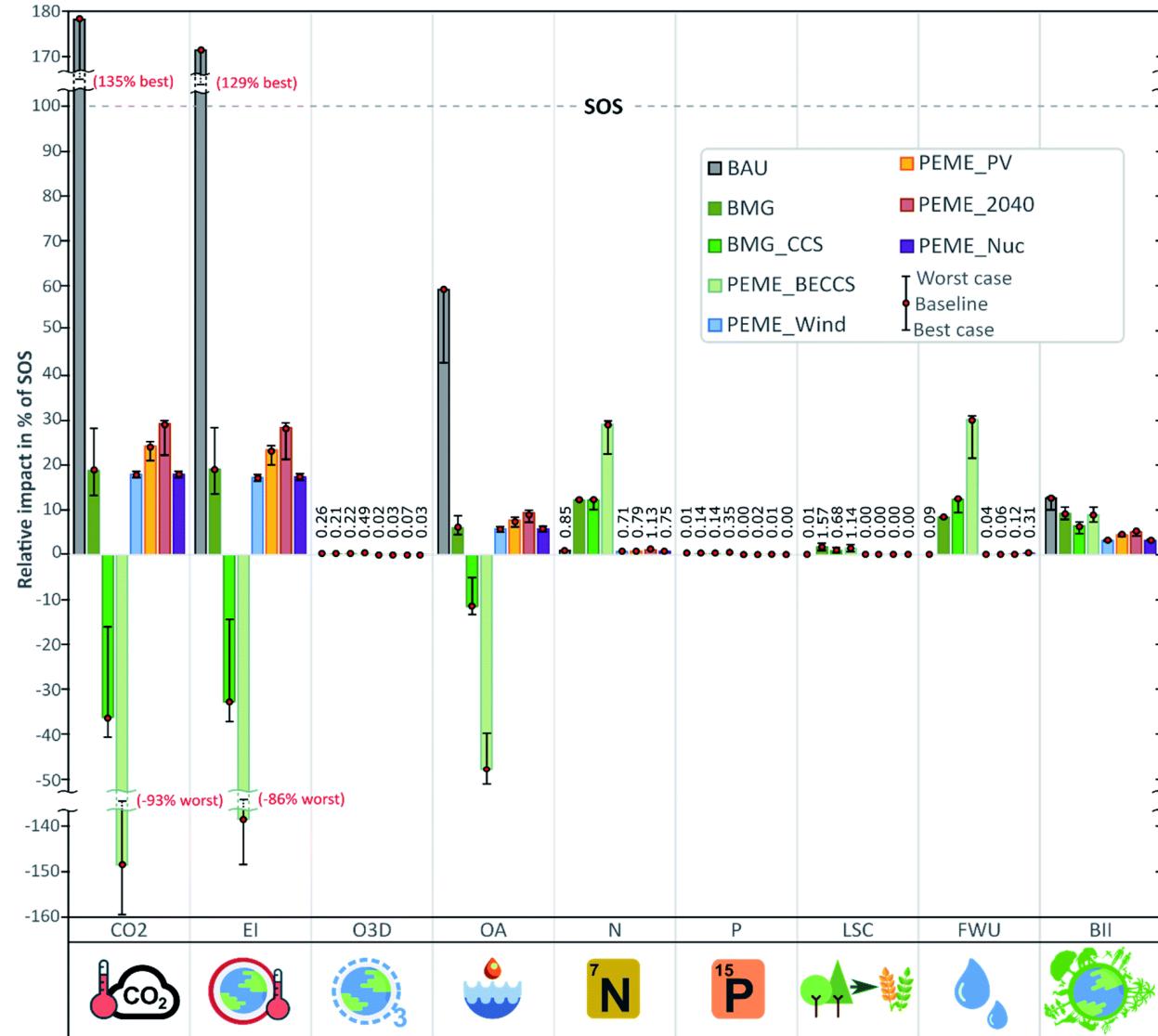
### LES LIMITES PLANÉTAIRES



Source : Stockholm Resilience Center

Traduction : Bon Pote

bon  
pote



# PHASE 4 : INTERPRÉTATION

## Analyse, critique

### Analyse

La phase d'interprétation doit être un commentaire des résultats, à la lumière des objectifs, des hypothèses prises à chaque étape

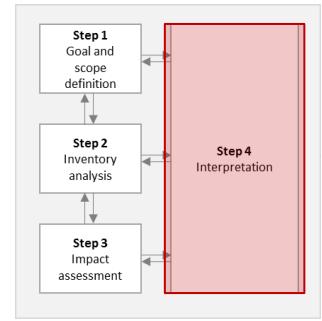
### Limites

Les **limites** de l'étude doivent être explicites, afin de ne pas utiliser les résultats hors du champ d'application de l'étude (e.g. confondre une région/année pour une autre)

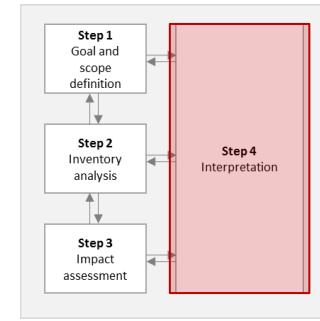
Les **incertitudes** doivent être couvertes autant que possible, notamment pour les paramètres influents (e.g. mix électriques pour les technologies électro-intensives, durée de vie d'un équipement, hypothèses d'utilisation...)

### Visualisation

C'est aussi la phase la plus "créative", où le but est de transmettre le message de l'analyse via des visualisations claires

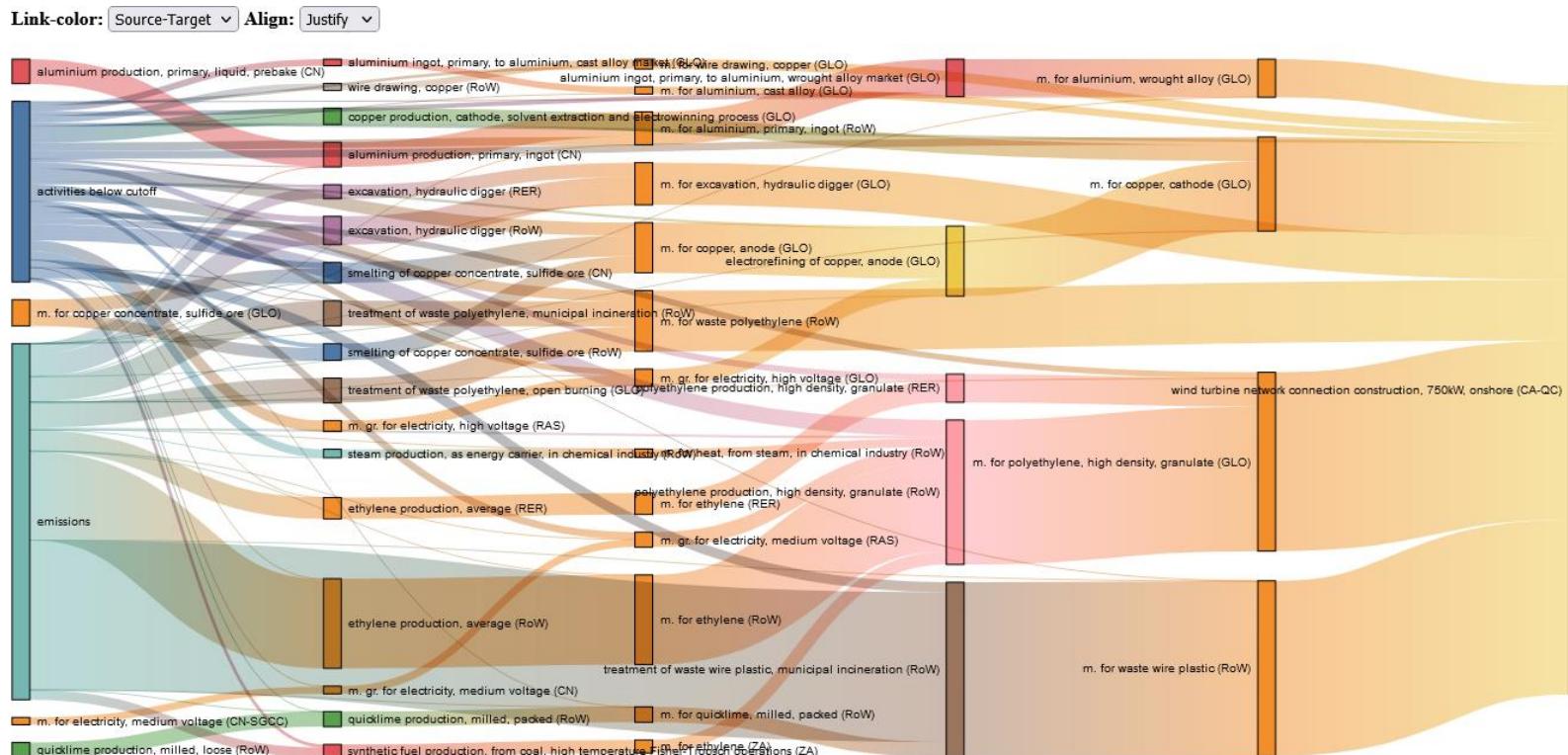


# PHASE 4 : INTERPRÉTATION

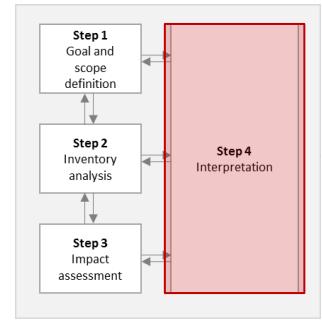


## Visualisation : de quelles activités proviennent les émissions ?

Exemple : 1 km d'infrastructure de connexion d'un parc éolien offshore

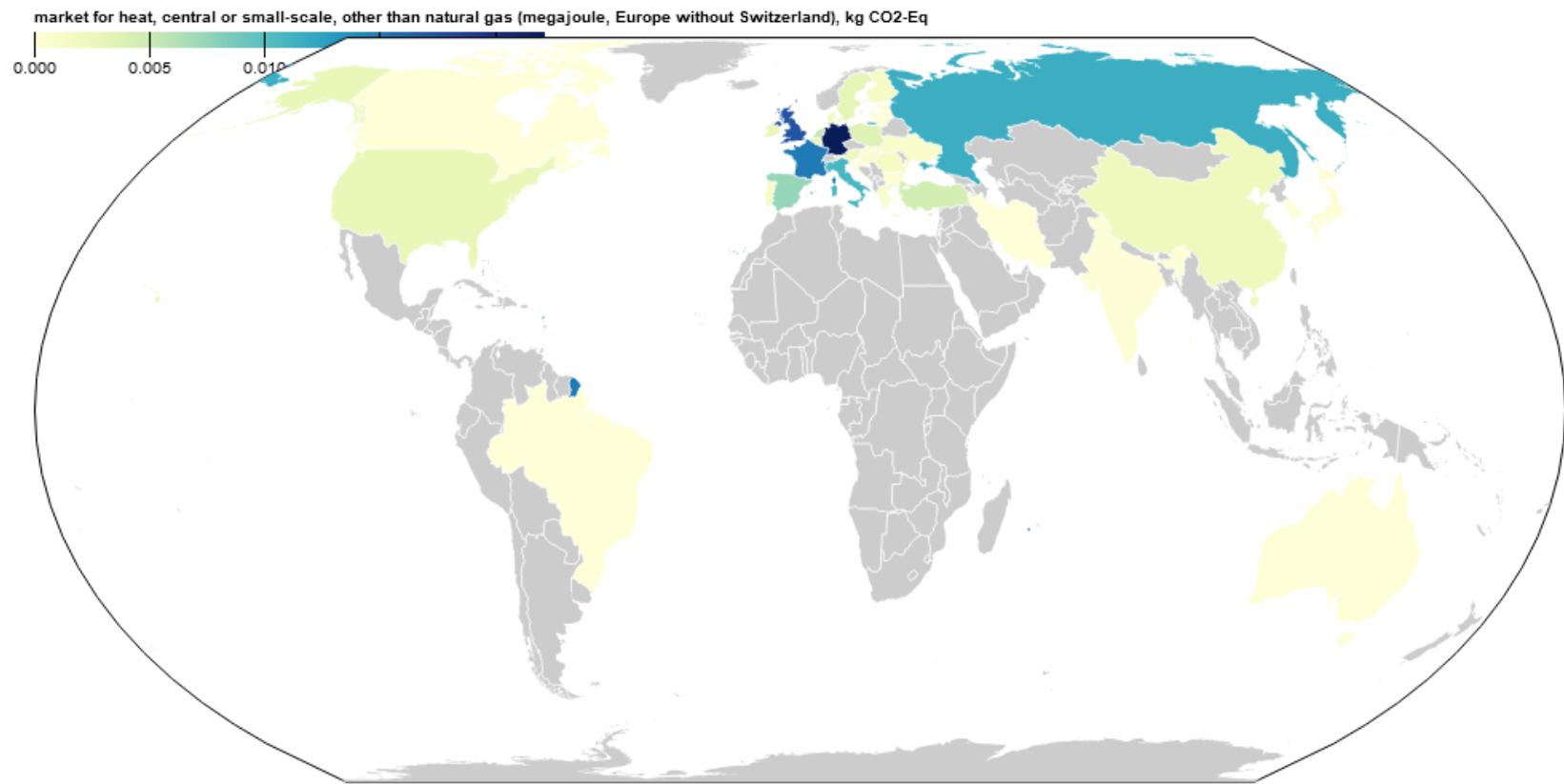


# PHASE 4 : INTERPRÉTATION



## Visualisation : de quelles régions proviennent les émissions ?

Exemple : 1 MJ de chauffage au gaz en Suisse



# PHASE 4 : INTERPRÉTATION

## Visualisation

**Émissions de la production de plastique dans le monde**

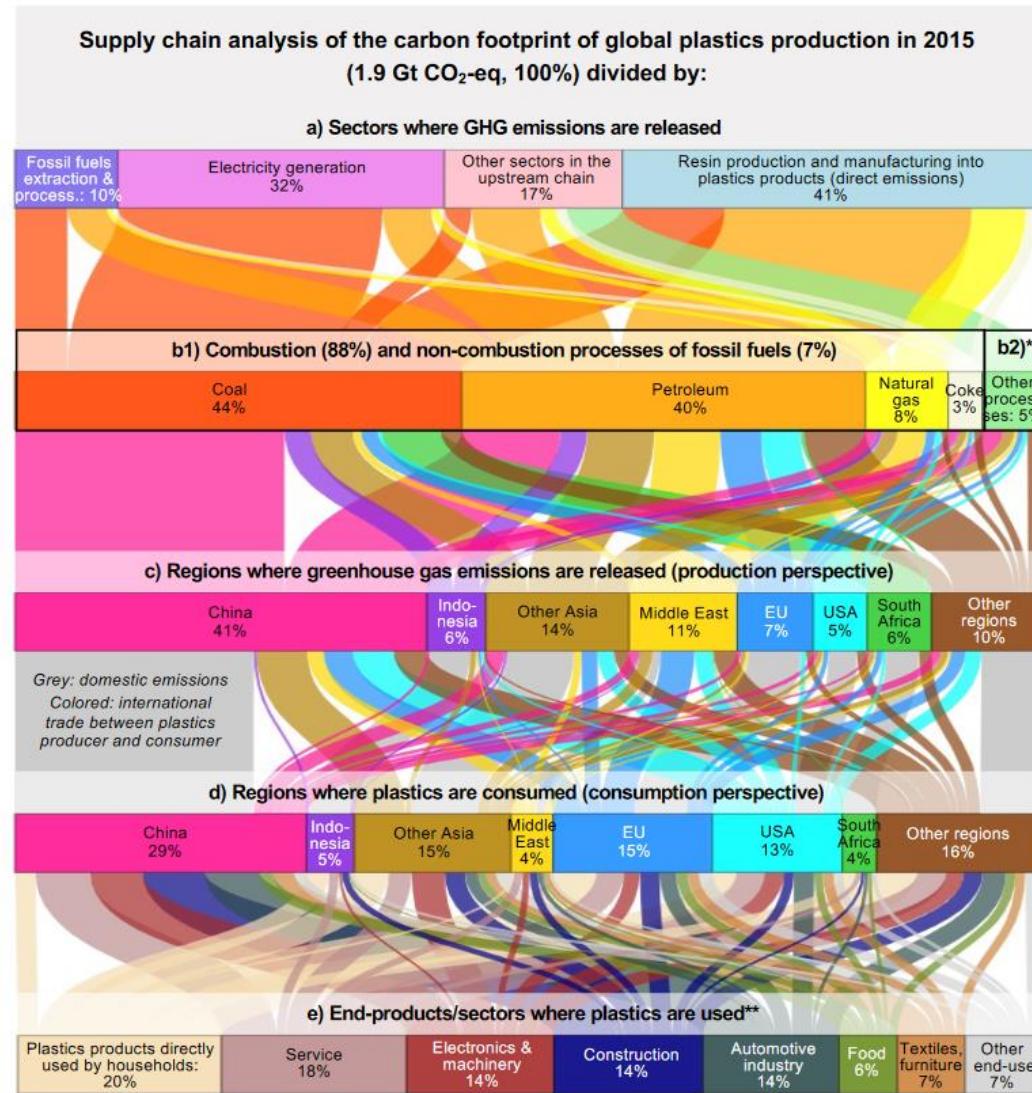
Par secteur

Par combustible

Par région de production

Par région de consommation

Par catégorie de produit



\*b2) Biogenic emissions (2.7%), HFC emissions (1.7%), cement production (0.8%)

\*\*e) Plastics packaging material is allocated to the end-product/sector where packaging material is used (e.g., food packaging in the food sector).

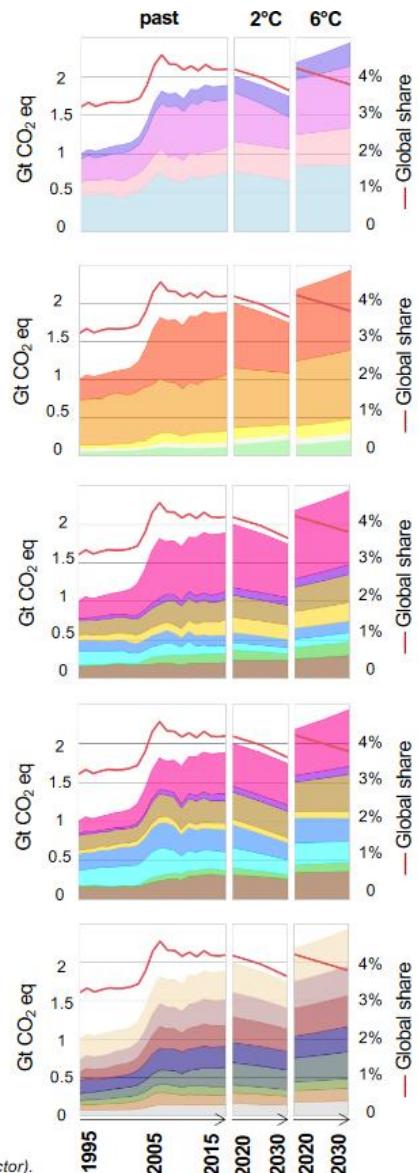


Image: Cabernard et al. 2022

# EXEMPLES

# COMPARAISON D'EMBALLAGES

Quelle est la meilleure façon de conditionner du vin, parmi 5 options ?

## Objectif

Parmi 5 options d'emballage, laquelle a le profil environnemental le plus vertueux ?

Carton (Tetrapak)

Cubi (“bag-in-box”)

Bouteille en verre à usage unique

Bouteille en verre réutilisable (consignée)

Bouteille en PET multicouche



Comparative life cycle assessment of alternative systems for wine packaging in Italy

Carmen Ferrara, Giovanni De Feo\*

Department of Industrial Engineering, University of Salerno, Via Giovanni Paolo II, 132, 84084, Fisciano, Salerno, Italy

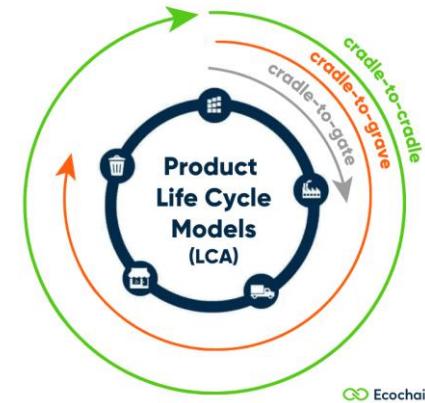


# COMPARAISON D'EMBALLAGES

## Phase 1 : objectif et champ d'application

### Approche

→ “cradle-to-grave” (du berceau à la tombe, c'est-à-dire en incluant la fin de vie post-consommation)



### Objectif

→ identifier l'option de conditionnement de vin ayant les impacts environnementaux les plus bas

### Contexte

→ Italie en 2020

### Analyse de sensibilité

→ poids des contenants, distances de distribution, options de traitement de fin de vie

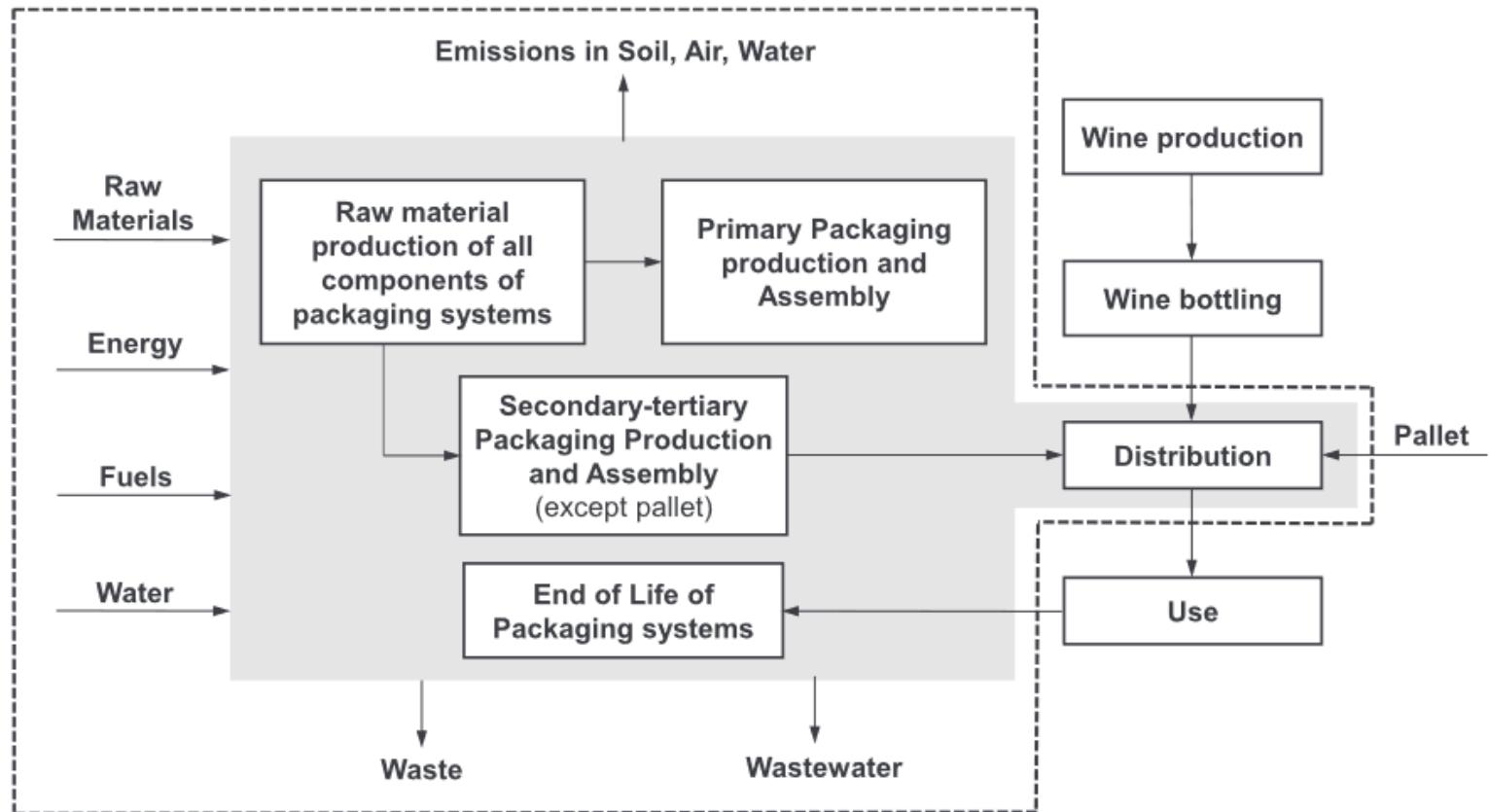
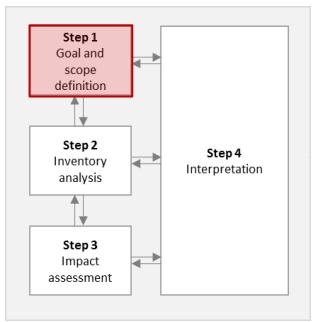


### Unité fonctionnelle

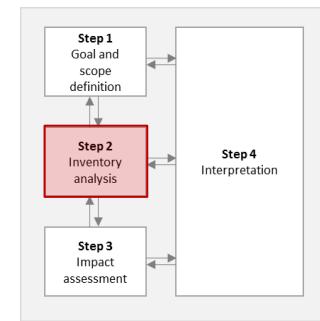
→ « emballage requis pour l'embouteillage et la distribution de 3 litres de vin »

# COMPARAISON D'EMBALLAGES

## Phase 1 : frontières du système



# COMPARAISON D'EMBALLAGES



## Phase 2 : analyse d'inventaire

**Table 2**

Inventory data of weight and composition of all components of aseptic carton system packaging (data provided by Tetra Pak company).

**Aseptic Carton** **Table 3**

Polylaminated paper  
Cardboard layers  
LDPE layers  
Aluminium foil  
Closure  
HDPE components  
PP components  
**Printing Ink**  
**Σ Primary packaging**  
Cardboard bottle  
Cardboard box  
Cardboard sheet  
Cardboard corner  
PE stretch film  
**Σ Secondary packaging**  
**Σ Packaging System**

Inventory data of weight and composition of all components of bag-in-box system packaging (data provided by two manufacturing companies: K.R.C A. Srl and Viton Moulding Srl).

**Table 4**

Bag-in-Box  
Bag  
LDPE layers  
PET-Met layer  
Box  
Fluting medium  
Linerboard layer  
Handle (HDP)  
Tap  
HDPE components  
PP components  
**Printing Ink**  
**Σ Primary packaging**  
Cardboard bottle  
Cardboard box  
Cardboard sheet  
Cardboard corner  
PE stretch film  
**Σ Secondary packaging**  
**Σ Packaging System**

Inventory data of weight and composition of all components of single use glass bottle system packaging (data provided by wineries).

**Table 5**

Single use glass  
Bottle  
Capsule (Al)  
Cork stopper  
**Σ Primary packaging**  
Cardboard bottle  
Cardboard box  
Cardboard sheet  
Cardboard corner  
PE stretch film  
**Σ Secondary packaging**  
**Σ Packaging System**

Inventory data of weight and composition of all components of refillable glass bottle system packaging (data provided by wineries).

**Table 6**

Refillable glass  
Bottle  
Capsule (Al)  
Cork stopper  
**Σ Primary packaging**  
Cardboard bottle  
Cardboard box  
Cardboard sheet  
Cardboard corner  
PE stretch film  
**Σ Secondary packaging**  
**Σ Packaging System**

Inventory data of weight and composition of all components of multilayer PET bottle system packaging (data provided by Cantina Minazzini Srl).

Multilayer PET bottle	Weight of single piece (g)	Weight of FU (g)
Bottle	50.0	200.0
Screw cap and capsule (Al)	4.9	19.8
<b>Σ Primary packaging</b>	<b>54.9</b>	<b>219.8</b>
Cardboard box	244 <sup>a</sup>	162.7
Cardboard sheet	830 <sup>b</sup>	29.1
Cardboard corner	282 <sup>c</sup>	7.9
PE stretch film	10.0 <sup>d</sup>	2.6
<b>Σ Secondary-Tertiary packaging</b>		<b>202.3</b>
<b>Σ Packaging System</b>		<b>422.0</b>

<sup>a</sup> Weight of one cardboard box (secondary packaging) that contain 6 multilayer PET bottles.

<sup>b</sup> Weight of one cardboard sheet (tertiary packaging needed for palletizing). Five sheets were considered for one pallet.

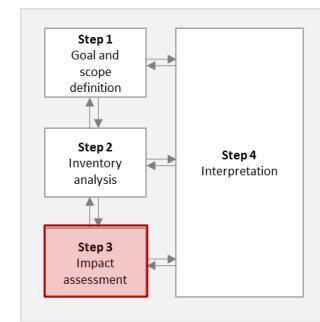
<sup>c</sup> Weight of one cardboard corner (tertiary packaging needed for palletizing). Four corners were considered for one pallet.

<sup>d</sup> Weight of 1 m of PE stretch film (tertiary packaging needed for palletizing).

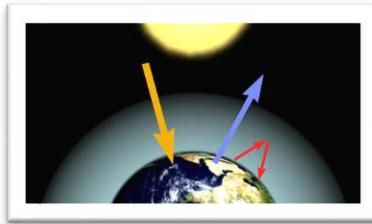


# COMPARAISON D'EMBALLAGES

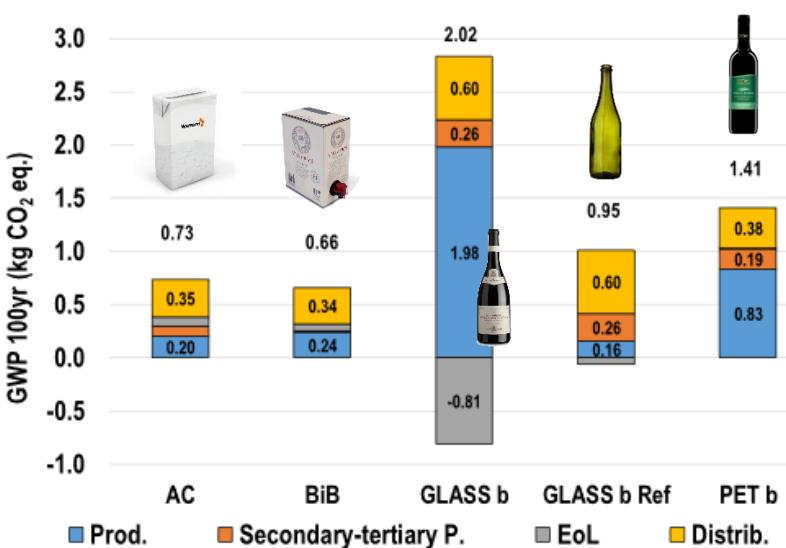
## Phase 3 : évaluation d'impact



Method:  
ReCiPe 2016



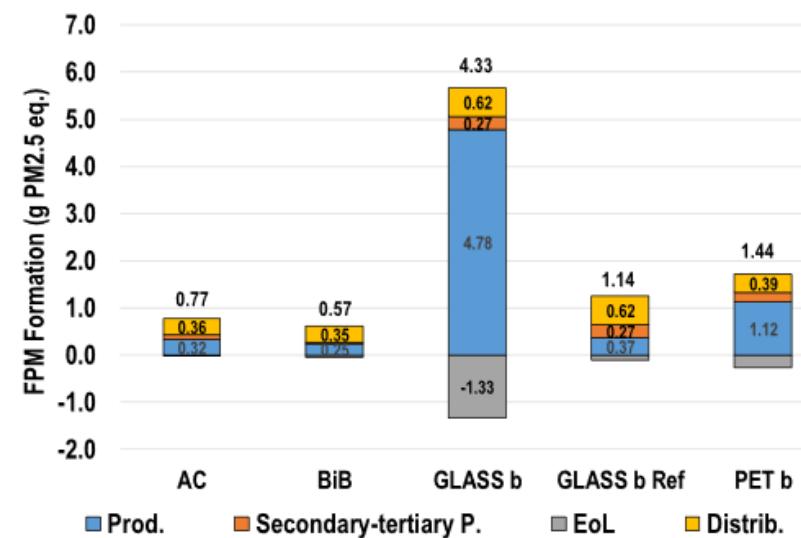
Global warming potential



(a)



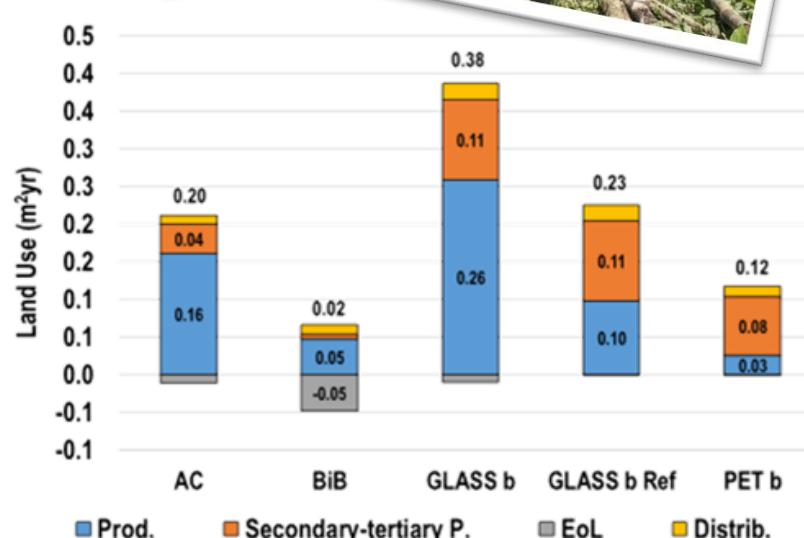
Particulate matter



(b)



Land use



(c)

**Fig. 3.** Contributions of each phase to the total impact, evaluated with the following midpoint categories: Global Warming Potential (a); Fine Particulate Matter Formation (b); Land Use (c); Fossil Resources Scarcity (d).

# COMPARAISON D'EMBALLAGES

## Phase 4 : interprétation

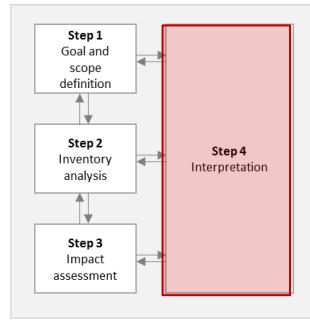
Le « bag-in-box » est l'alternative la plus respectueuse de l'environnement *pour les aspects pris en compte*

Les cartons « Tetrapak » n'ont que des performances environnementales légèrement inférieures

Les bouteilles en verre à usage unique sont la pire alternative d'emballage (en termes d'énergie, de ressources matérielles, et d'emprise au sol)

La réutilisation des bouteilles en verre en Italie est une alternative pratique **uniquement pour le marché local** (conclusion de l'analyse de sensibilité sur les distances de transport)

Ferrara and De Feo, 2020



# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

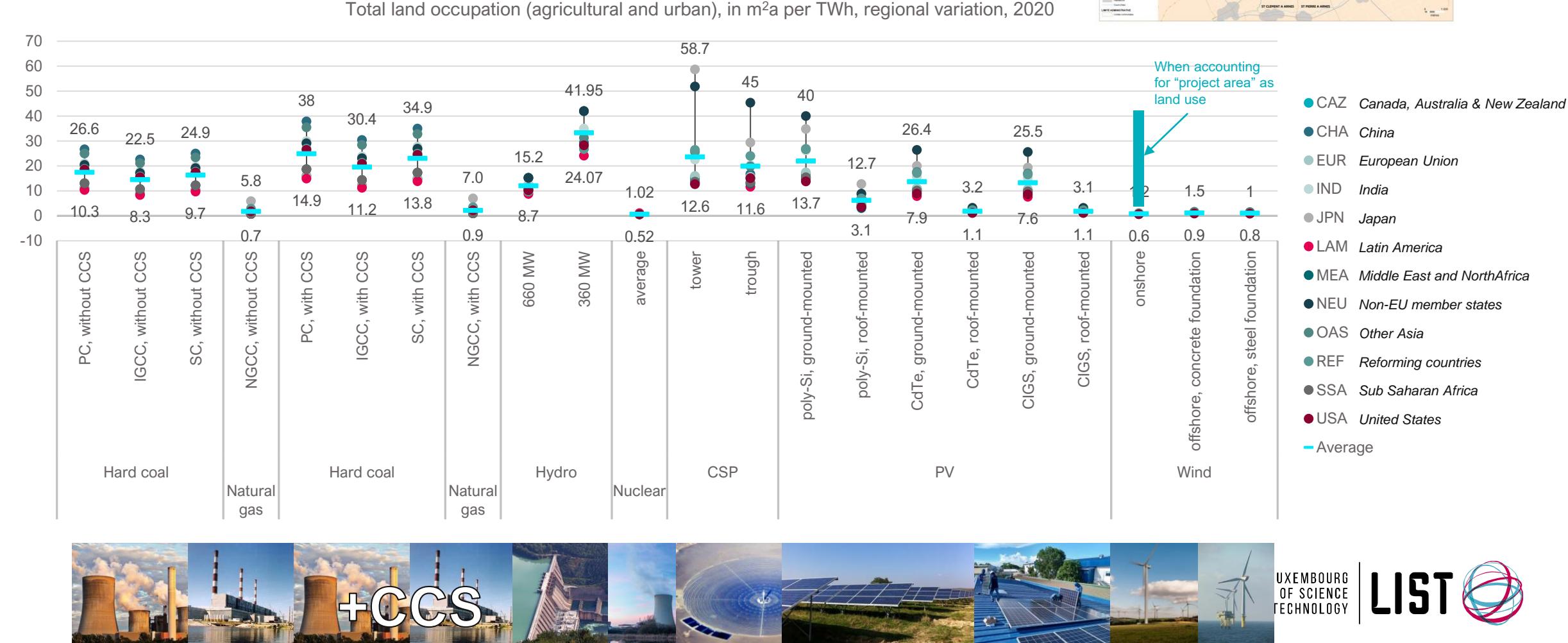
## Émissions régionales de GES sur l'ensemble du cycle de vie, g CO<sub>2</sub> eq./kWh

Lifecycle GHG emissions, in g CO<sub>2</sub> eq. per kWh, regional variation, 2020



# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

## Cycle de vie de l'occupation du sol, en m<sup>2</sup>-annum/MWh

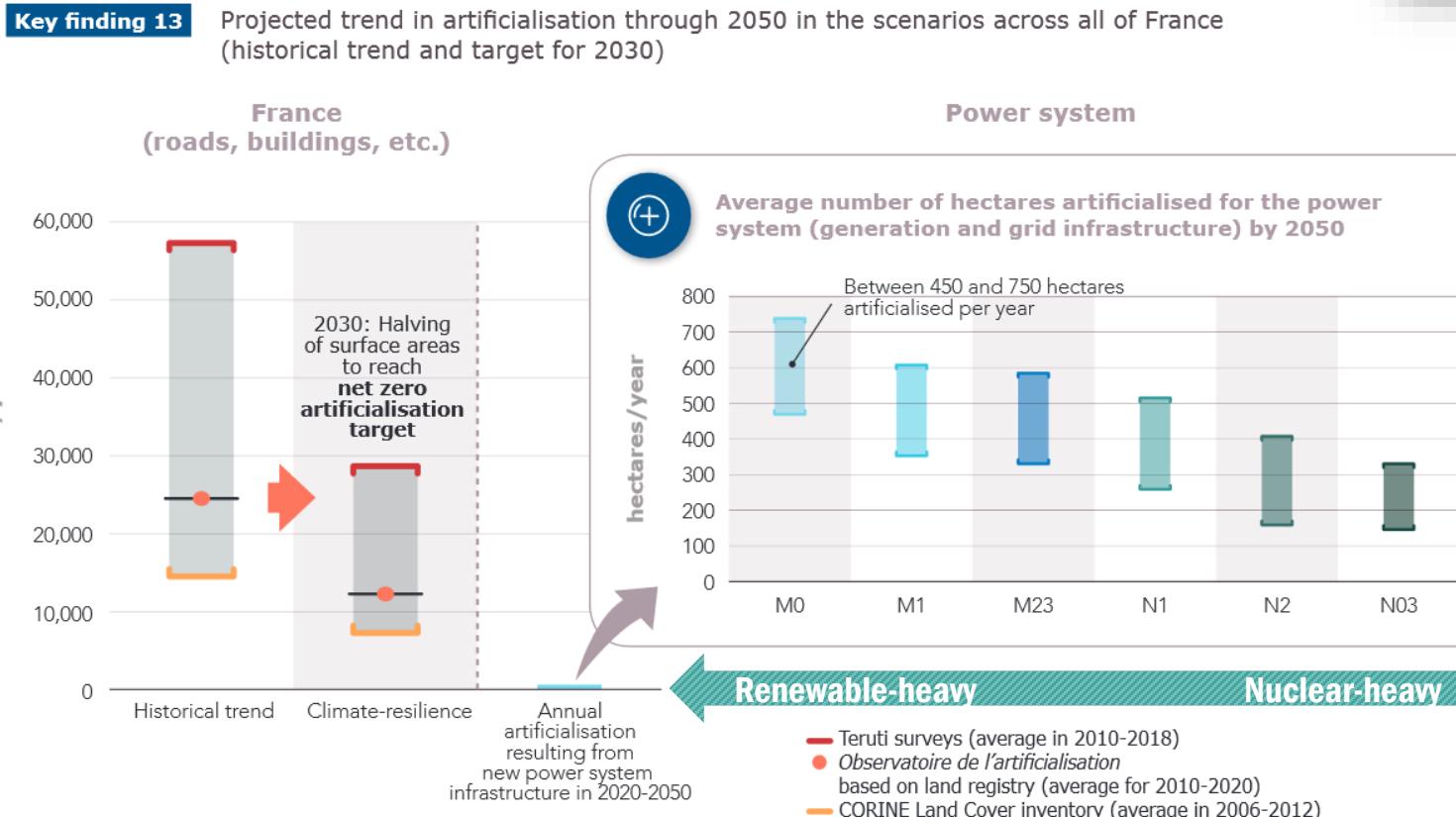
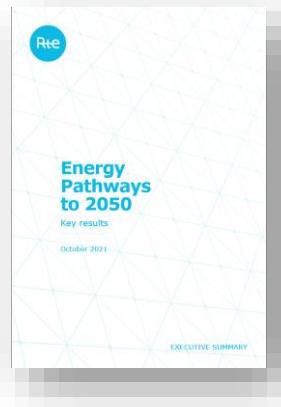


# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

## Emprise directe vs. totale

L'artificialisation des terrains reste mineure par rapport aux infrastructures existantes et futures telles que les routes et les bâtiments.

Extrait d'un rapport RTE comparant les terrains occupés par les nouvelles infrastructures électriques aux terrains imperméabilisés par d'autres infrastructures (routes, bâtiments...)



Source: CEREMA, 2021, "The determinants of the use of space".

Note: Artificialisation volumes vary depending on the valuation method used (land registry, sample surveys).

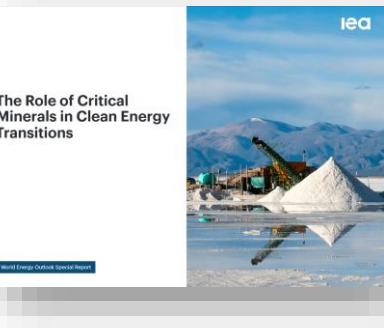
In accordance with the agreement set forth the climate and resilience act, the surface area under solar panels is counted as artificialised surface area here.



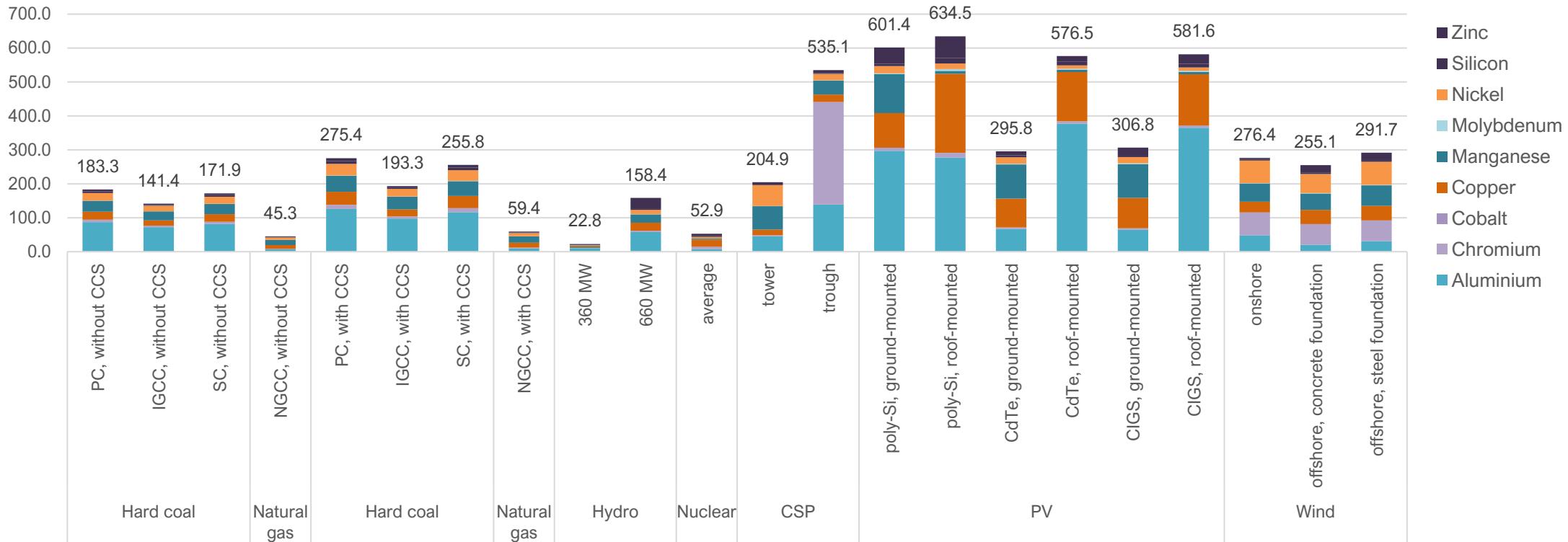
# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

⚠️ Empreinte matière ≠ Quantité de matière dans le produit fini !

## Empreinte matière sur l'ensemble du cycle de vie (pour une liste limitée), en g per MWh



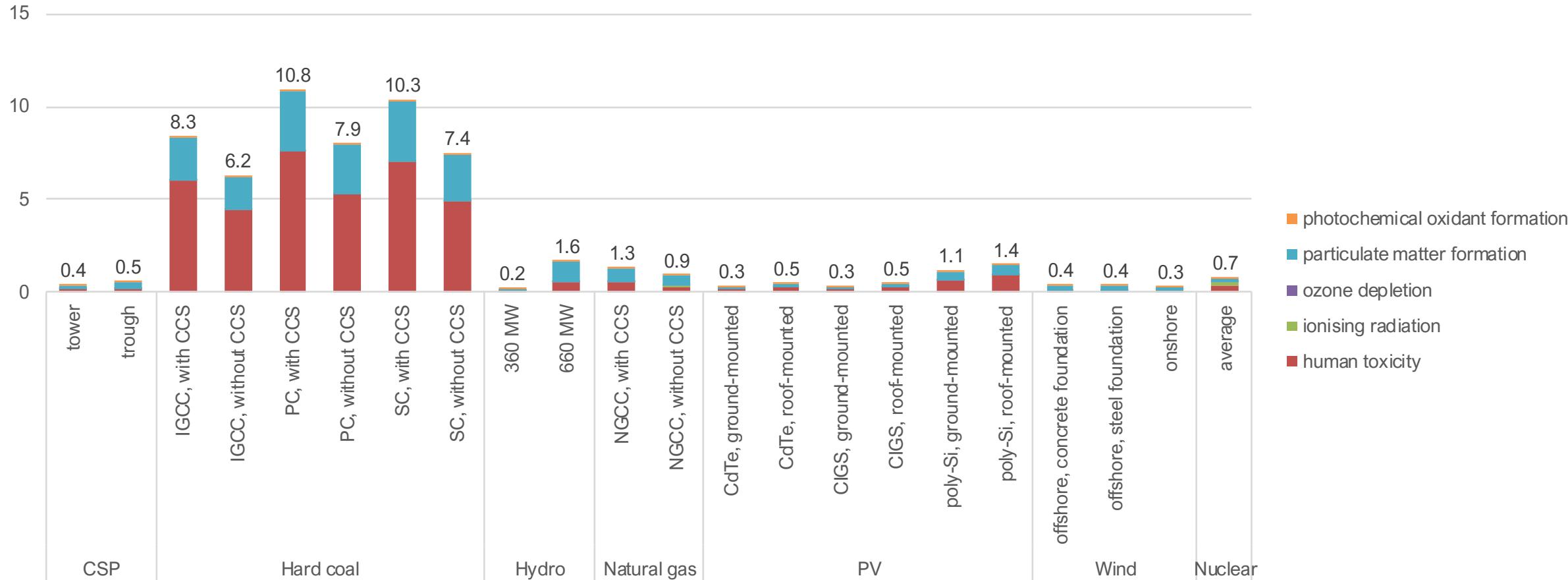
Material requirements, in g per MWh



# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

## Score agrégé : santé humaine

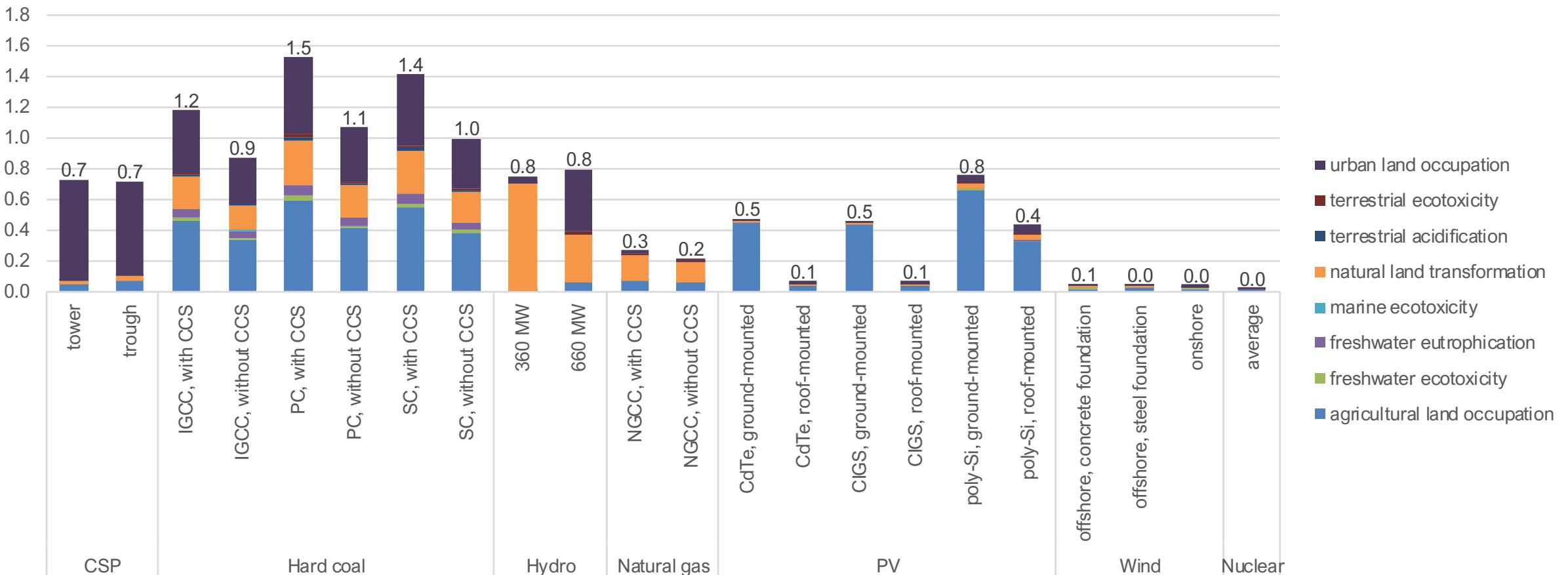
Lifecycle impacts on human health, excluding climate change, per kWh, in millipoints



# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

## Score agrégé : écosystèmes

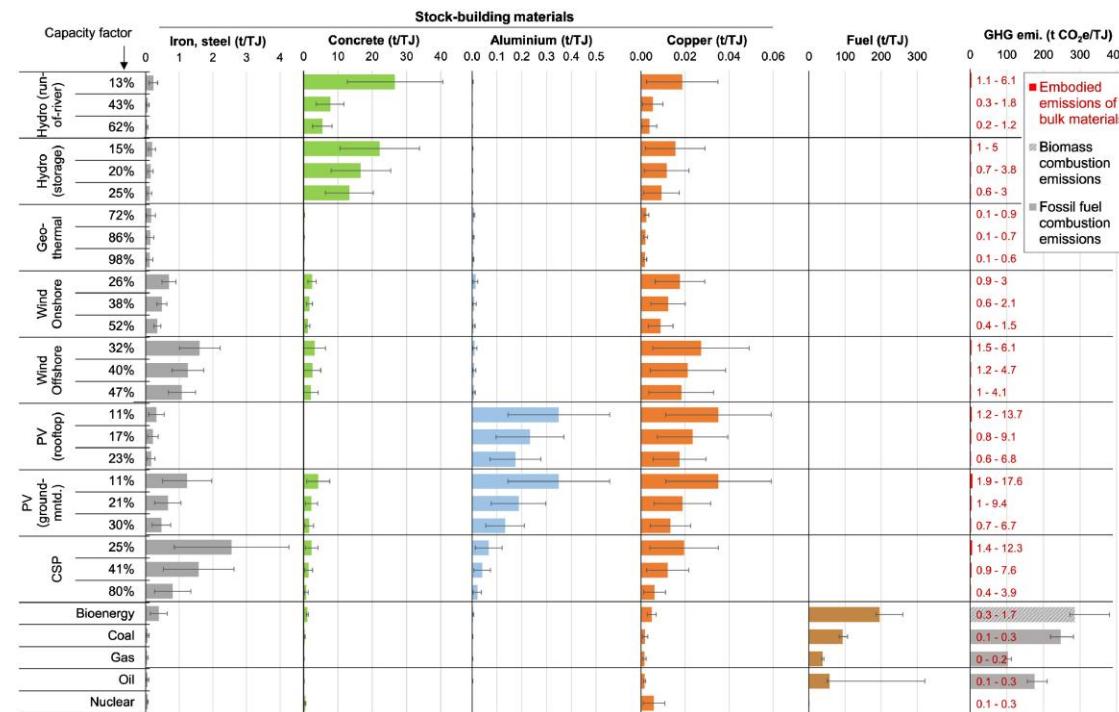
Lifecycle impacts on ecosystems, excluding climate change, per kWh, in micropoints



# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Criticité des matériaux : beaucoup d'estimations, peu de consensus

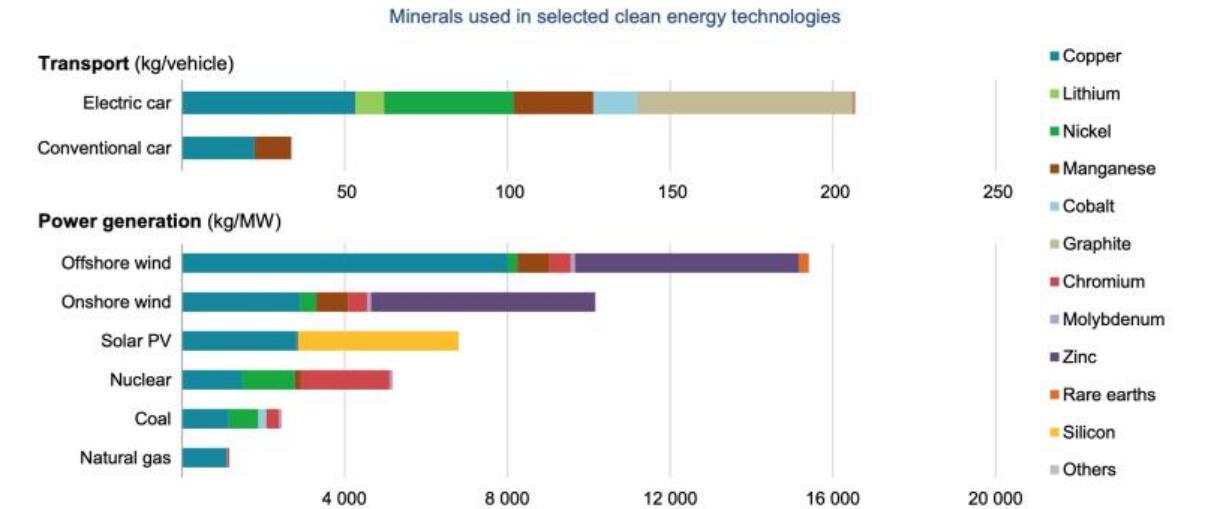
## Matériaux de construction



Kalt, G., Thunshirn, P., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Haas, W., & Haberl, H. (2021). Material stocks in global electricity infrastructures—An empirical analysis of the power sector's stock-flow-service nexus. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105723.

## Matériaux critiques, IEA

The rapid deployment of clean energy technologies as part of energy transitions implies a significant increase in demand for minerals



IEA. All rights reserved.



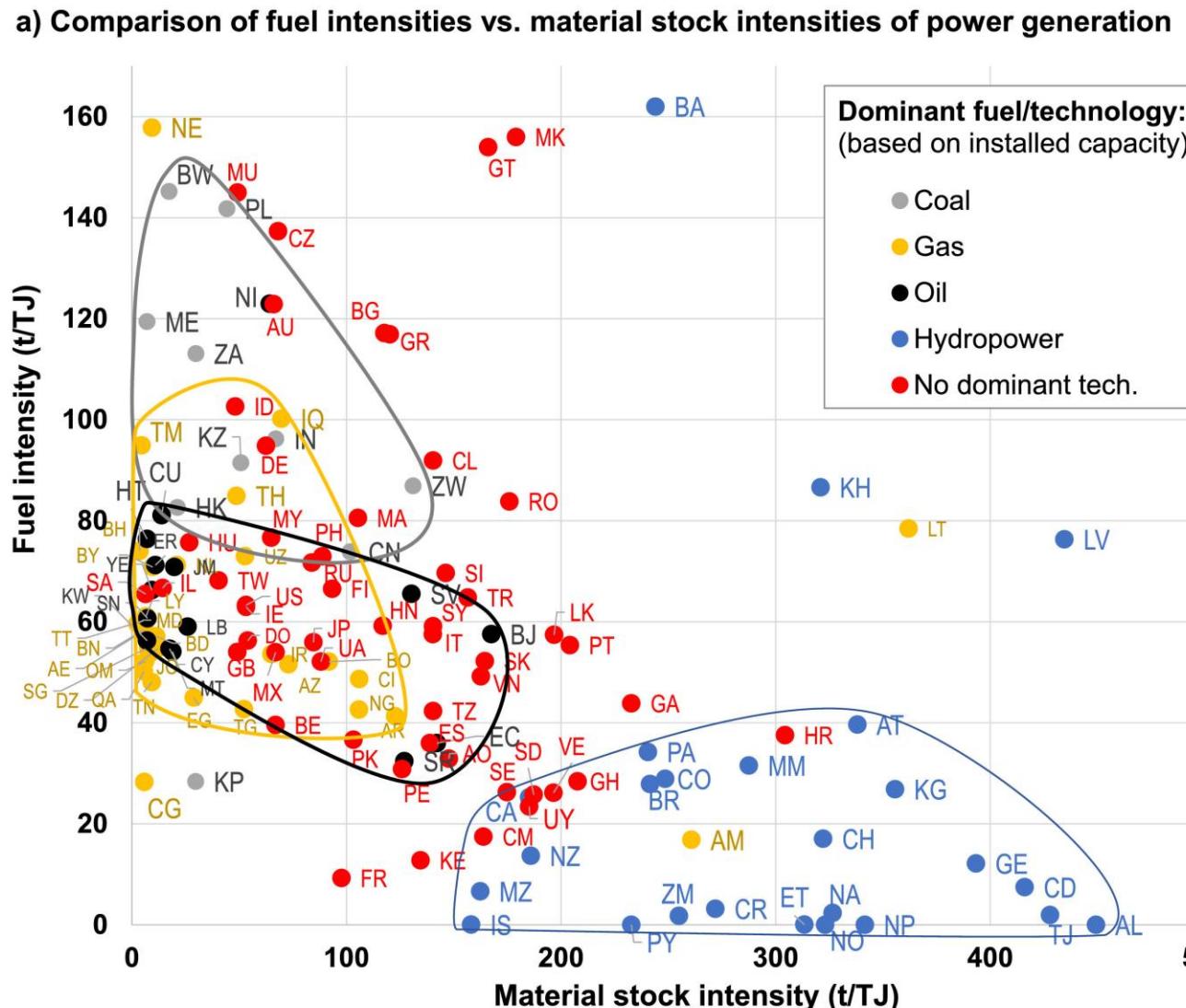
# COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

## La décarbonisation crée-t-elle une pression sur les matériaux ?

En termes de volume, les matériaux de construction (acier, béton, aluminium, cuivre) sont dominants

La transition d'une *forte intensité de carbone* à une *forte intensité de matériaux* est principalement dû à l'hydroélectricité, en raison des quantités de béton dans les barrages

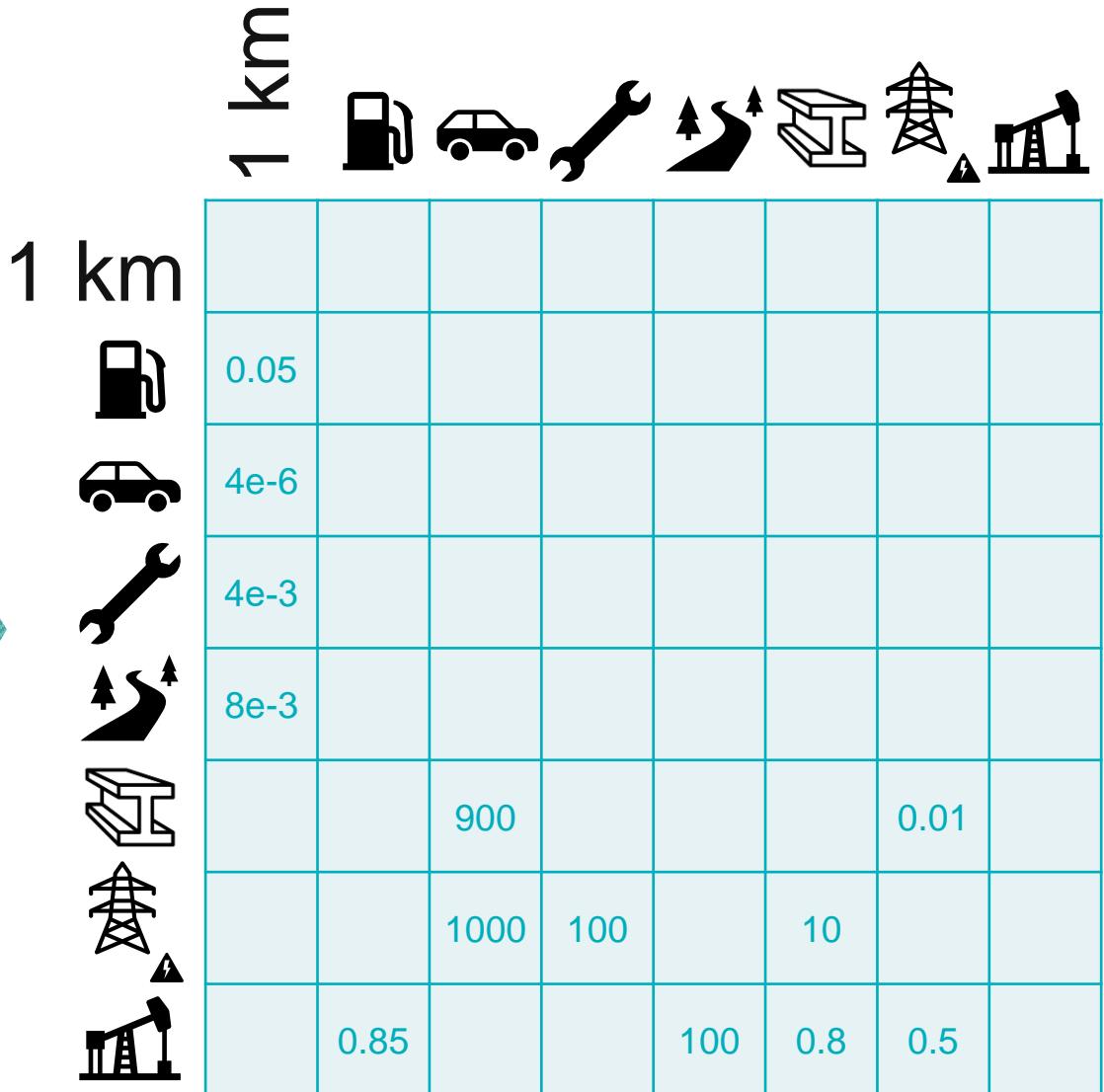
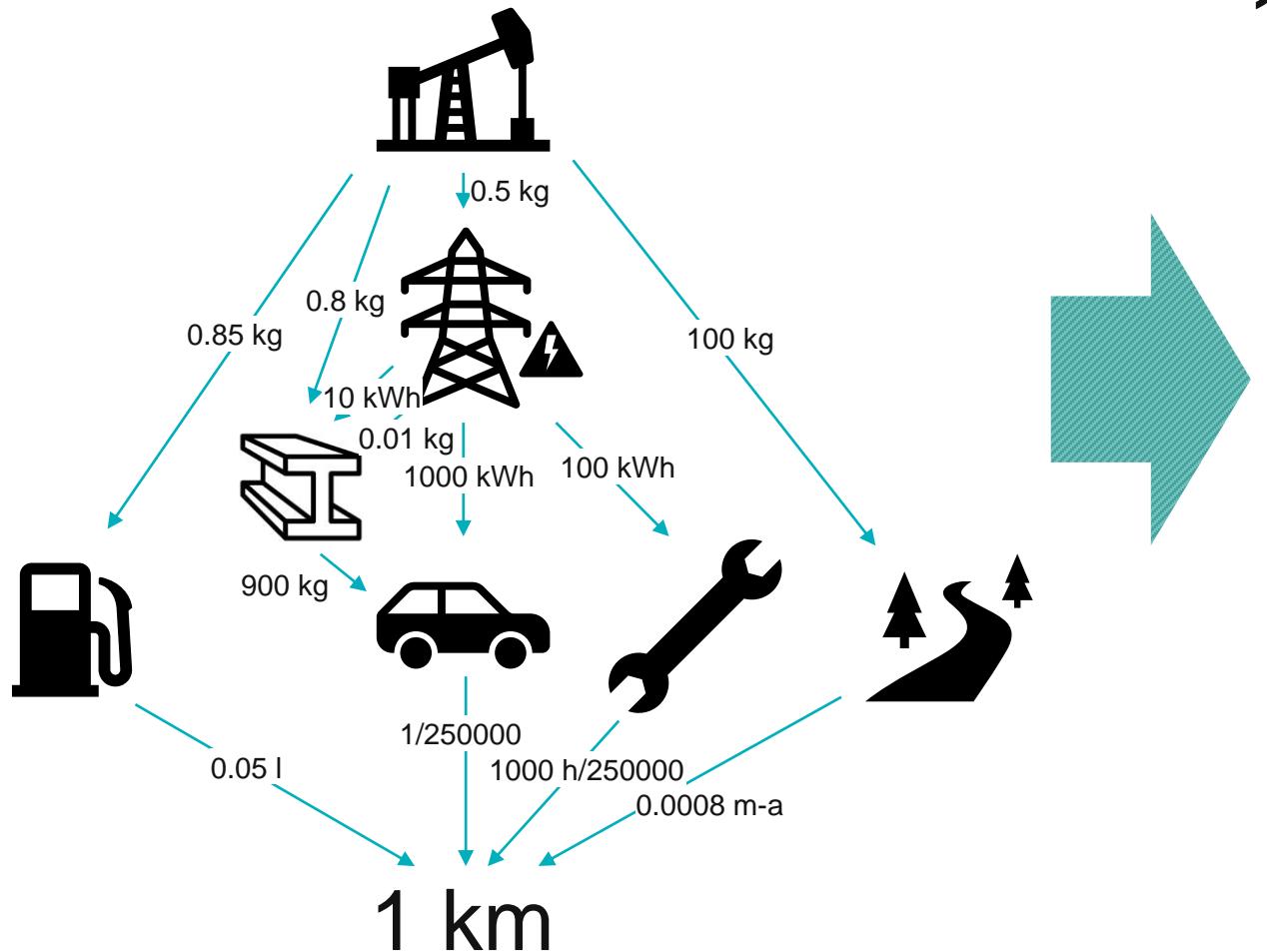
Mais cela n'est pas représentatif du « stress » ou de la « criticité » réels de l'utilisation des matériaux



# 03 | ÉTUDE DE CAS

# UN PEU D'ALGÈBRE

## Formulation d'un modèle ACV



# UN PEU D'ALGÈBRE

The diagram illustrates a 7x7 matrix representing industrial activity flows. The columns and rows are labeled with icons representing different sectors: Fuel Pump, Car, Wrench, Mountain with arrow, Steel Beam, Power Line, and Oil Pump. The matrix values are as follows:

Fuel Pump	Car	Wrench	Mountain with arrow	Steel Beam	Power Line	Oil Pump
Fuel Pump	0.05					
Car	4e-6					
Wrench	4e-3					
Mountain with arrow	8e-3					
Steel Beam		900				0.01
Power Line		1000	100		10	
Oil Pump	0.85			100	0.8	0.5

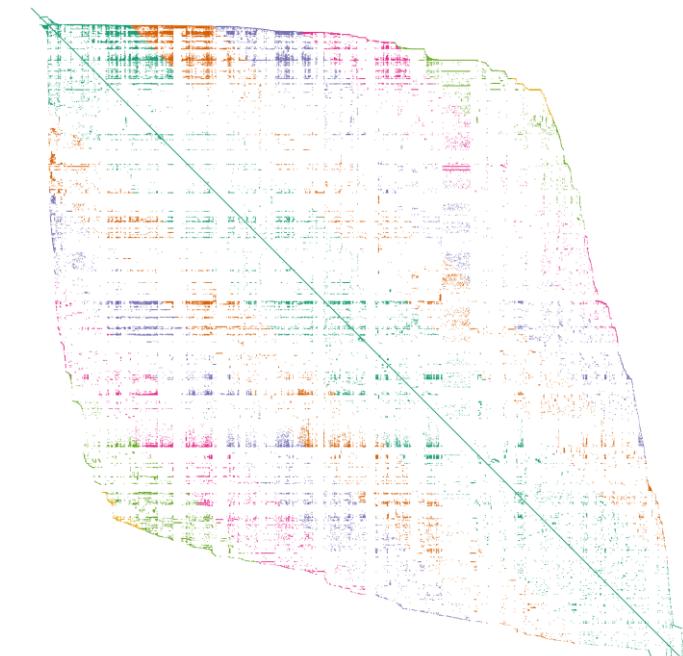
## La matrice "A"

...appelée la **technosphère**, contient toutes les informations de flux physiques, échanges entre activités industrielles

Chaque colonne représente la « recette » permettant de fabriquer une unité

La base de données « ecoinvent » contient plus de 20000 procédés avec leurs interactions

**ecoinvent**



# UN PEU D'ALGÈBRE

$A$

1 km

fuel pump	car	wrench	road	building	electricity pylon	oil pump
fuel pump	0.05					
car	4e-6					
wrench	4e-3					
road	8e-3					
building	900					
electricity pylon	1000	100		100	0.8	0.5
oil pump	0.85					

$y$  demande finale  
(unité fonctionnelle)

$x$  production totale  
(total output)

## La matrice “A”

...peut contenir des boucles !

Produire de l'acier requiert de l'électricité, dont l'infrastructure de production requiert elle-même de l'acier...

Pour résoudre le cas générique, il faut poser l'« équation de production » du système

$$x = y + Ax$$

« la production totale est égale à ma demande finale, plus tout ce dont j'ai besoin en amont pour fournir cette production »

...et la résoudre pour trouver la production totale



# UN PEU D'ALGÈBRE

## L'inverse de Leontief

$$x = y + Ax$$

$$x - Ax = y$$

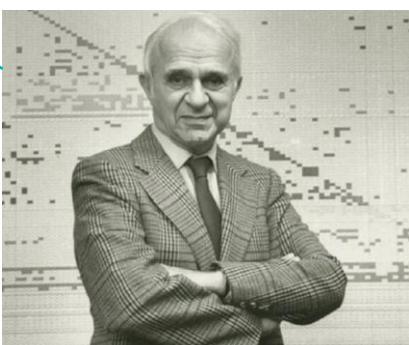
$$(I - A)x = y$$

$$x = (I - A)^{-1}y$$

$$x = Ly$$

« L » pour

Wassily Leontief,  
économiste  
américain (prix  
Nobel 1973)



*\*(I-A) est inversible sous certaines conditions – lesquelles ? Quelles en sont les interprétations physiques ?*

$L$	1 km							
1 km	1.0							
1 km	0.1	1						
1 km	4.0E-06		1					
1 km	4.0E-03			1				
1 km	8.0E-03				1			
1 km	8.5E-03		10111	1		1	1.1E-02	
1 km	0.5		11111	111		11	1	
1 km	1.1	1	6364	56	100	6	1	1

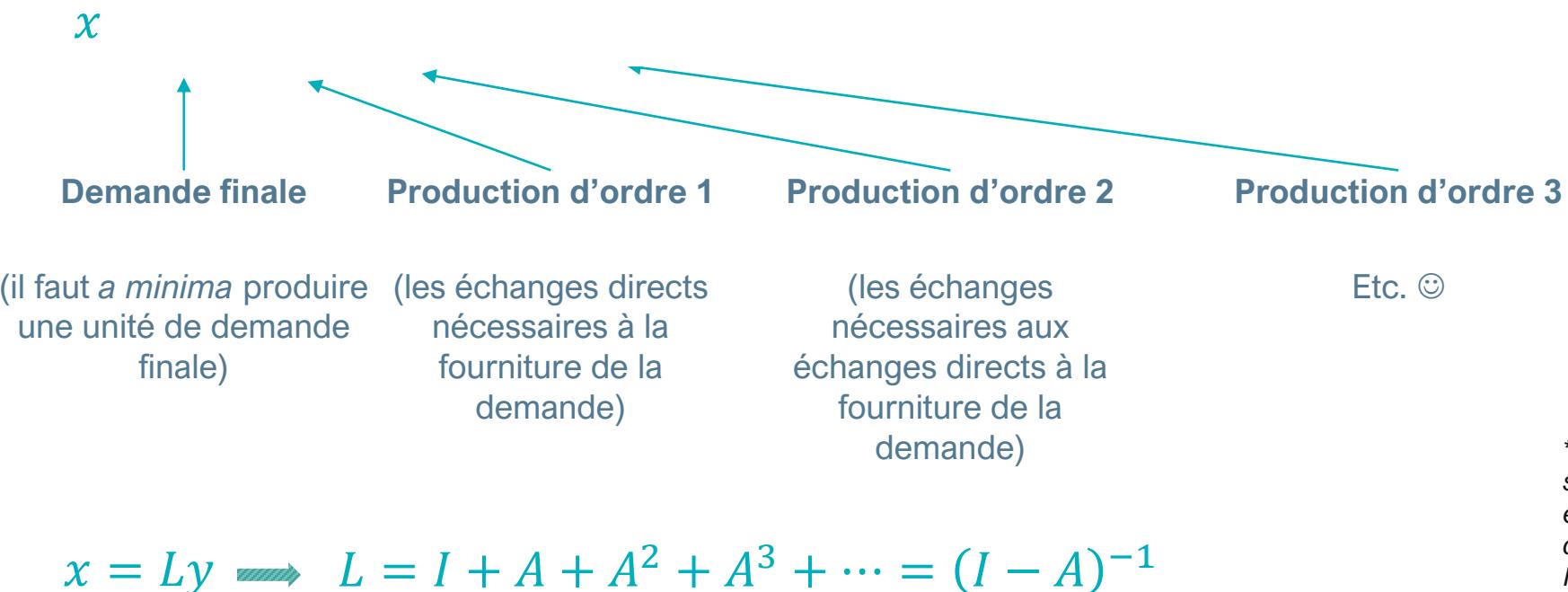
## La matrice “L”

...permet d'obtenir les échanges nécessaires en « **cycle de vie** », et non plus seulement les échanges directs

# UN PEU D'ALGÈBRE

## L'inverse de Leontief – méthode alternative

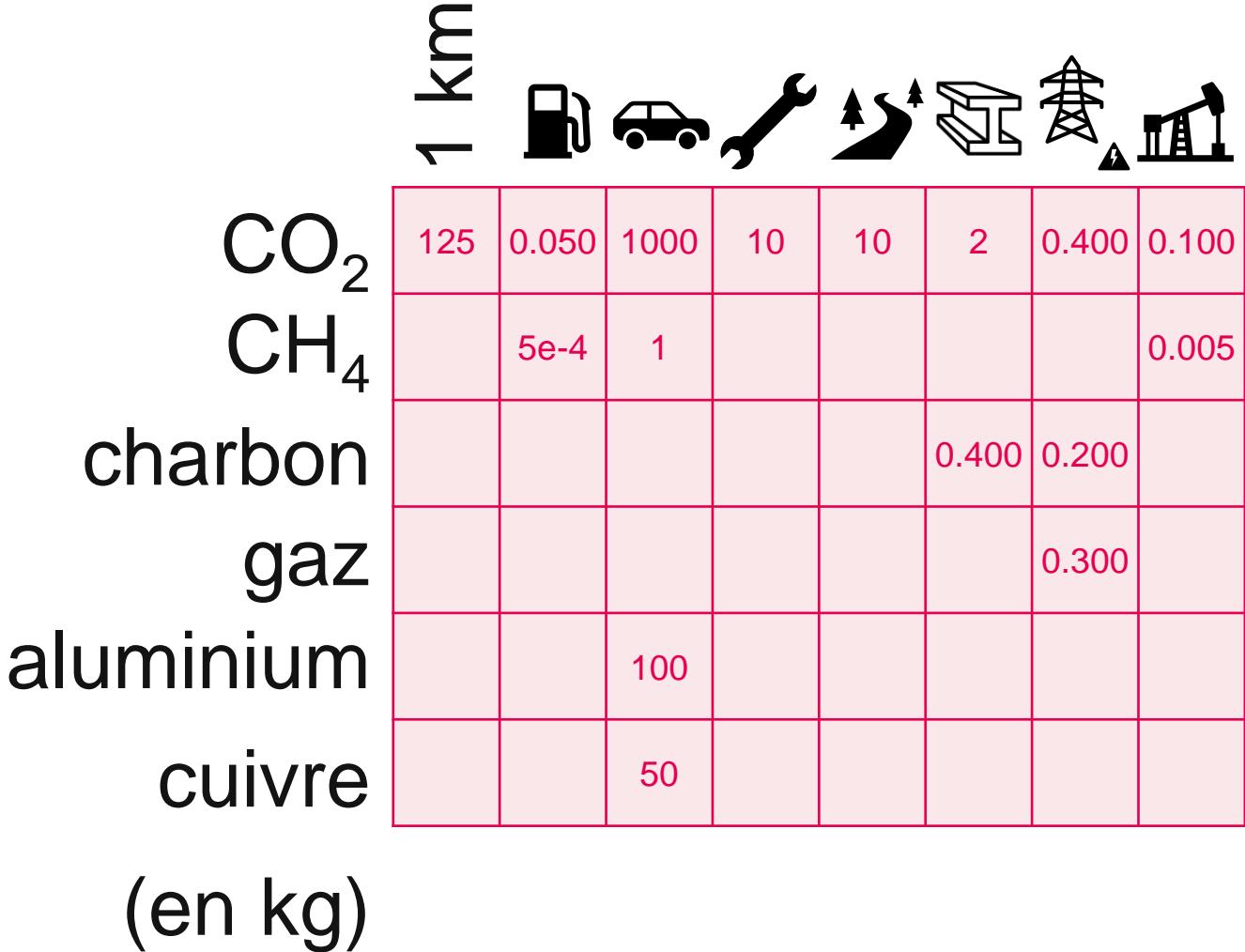
Par définition, L contient les coefficients d'échange entre activités, en couvrant les échanges directs et l'ensemble de la chaîne de valeur amont, ce qui peut se réinterpréter



\*l'égalité de la série avec son expression analytique est vraie sous certaines conditions - lesquelles ?  
Interprétation ?

# UN PEU D'ALGÈBRE

Et l'environnement dans tout ça ?



## La matrice “B”

...appelée la **biosphère**, contient toutes les informations de flux physiques, échanges entre les activités industrielles et l'environnement

Ces échanges, aussi appelés “flux élémentaires”, peuvent être entrant (ressources énergétiques ou matérielles) ou sortant (émissions)

**ecoinvent**  
contient plus de  
2000 substances

name	compartment	subcompartment	unitName	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, un-air	Urban air close to ground kg
Methane, dichloro-, HCC-30	air	urban air close to ground	kg	Particulates > 2.5 um, and <10um	Urban air close to ground kg
Propanol	air	urban air close to ground	kg	Particulates > 10 um	Urban air close to ground kg
Methanol	air	urban air close to ground	kg	Particulates < 2.5 um	Urban air close to ground kg
Methanesulfonic acid	air	urban air close to ground	kg	Formaldehyde	Urban air close to ground kg
Ethanol	air	urban air close to ground	kg	2-Aminopropanol	Urban air close to ground kg
Aminoacetic acid	air	urban air close to ground	kg	Ethene	Urban air close to ground kg
Propene	air	urban air close to ground	kg	Chloroprene	Urban air close to ground kg
Sulfur dioxide	air	urban air close to ground	kg	Propylene oxide	Urban air close to ground kg
Water	air	unspecified	m3	Propionic acid	Urban air close to ground kg
Toluene	air	urban air close to ground	kg	Acetic acid	Unspecified kg
Carbon dioxide, fossil	air	urban air close to ground	kg	Hydrogen	Unspecified kg
Chloroacetic acid	air	urban air close to ground	kg	Carboxylic acid	Unspecified kg
Chlorine	air	urban air close to ground	kg	Carbon monoxide, fossil	Unspecified kg
Hydrogen chloride	air	urban air close to ground	kg	Methanol	Unspecified kg
Dimethyl malonate	air	urban air close to ground	kg	Methane, fossil	Unspecified kg
Hydrogen fluoride	air	urban air close to ground	kg	Lead	Urban air close to ground kg
Methane, fossil	air	urban air close to ground	kg	Benzene, ethyl-	Urban air close to ground kg
Nitrogen oxides	air	urban air close to ground	kg	Methane, non-fossil	Urban air close to ground kg
Hydrogen	air	urban air close to ground	kg	Ethane, 1,2-dichloro-	Urban air close to ground kg
Methyl amine	air	urban air close to ground	kg	NMVOOC, non-methane volatile organ	Urban air close to ground kg
Sulfur dioxide	air	urban air close to ground	kg	Carbon disulfide	Urban air close to ground kg
Glycidic acid	air	urban air close to ground	kg	Carbon monoxide, non-fossil	Urban air close to ground kg
Benzene, dichloro	air	urban air close to ground	kg	Hydrogenes, unspecified	Urban air close to ground kg
Chlorosulfonic acid	air	urban air close to ground	kg	Xylene	Urban air close to ground kg
Acetic acid	air	urban air close to ground	kg	Antimony	Urban air close to ground kg
t-Butylamine	air	urban air close to ground	kg	Hydrogen fluoride	Urban air close to ground kg
Dipropylene	air	urban air close to ground	kg	Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyc	Urban air close to ground kg
Lactic acid	air	urban air close to ground	kg	Mercury	Urban air close to ground kg
Aniline	air	urban air close to ground	kg	Cadmium	Urban air close to ground kg
Carbon monoxide, fossil	air	urban air close to ground	kg	Silicon	Urban air close to ground kg
Dithyramine	air	urban air close to ground	kg	Chromium	Urban air close to ground kg
Propene	air	urban air close to ground	kg	Copper	Urban air close to ground kg
Acetalsalicylic acid	air	urban air close to ground	kg	Arsenic	Urban air close to ground kg
Ethyl acetate	air	urban air close to ground	kg	Dinitrogen monoxide	Urban air close to ground kg
Toluene, 2-chloro	air	urban air close to ground	kg	Zinc	Urban air close to ground kg
Methyl lactate	air	urban air close to ground	kg	Styrene	Urban air close to ground kg
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	air	urban air close to ground	kg	Carbon dioxide, non-fossil	Urban air close to ground kg
Phenol	air	urban air close to ground	kg	Mercury	Urban air close to ground kg
Nitrogen	air	unspecified	kg	Silver	Urban air close to ground kg
Carbon dioxide, fossil	air	unspecified	kg	Ethene, chloro-	Urban air close to ground kg
Butene	air	unspecified	kg	Sulfate	Urban air close to ground kg
2-Methyl-1-butene	air	urban air close to ground	kg	Hydrocarbons, aromatic	Urban air close to ground kg
3-Methyl-1-butanol	air	urban air close to ground	kg	Fluorine	Urban air close to ground kg
Ammonia	air	unspecified	kg	Hydrocarbons, chlorinated	Urban air close to ground kg
Acrolein	air	unspecified	kg	Glycidole	Urban air close to ground kg
Acetone	air	urban air close to ground	kg	Nickel	Urban air close to ground kg
4-Methyl-2-pentanone	air	urban air close to ground	kg	Benzene	Urban air close to ground kg
2-Propanol	air	urban air close to ground	kg	2-Propanol	Unspecified kg
2-Methyl pentane	air	urban air close to ground	kg	Acetone	Unspecified kg
Butene	air	urban air close to ground	kg	Emulsion	Unspecified kg
				Dinitrogen monoxide	Unspecified kg
				Carbon dioxide, fossil	Non-urban air or from high +kg

# UN PEU D'ALGÈBRE

## Dernière étape (ou presque)

GES  
Énergie primaire  
Matériaux

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	charbon	gaz	aluminium	cuivre
1	28					
		9.41	34.5			
				1.09e-09	0.001	37

## La matrice “C”

...appelée la matrice de caractérisation, agrège les flux élémentaires en indicateurs, traduisant chacun la magnitude d'un impact environnemental

Déterminer les facteurs de caractérisation pour chaque indicateur fait l'objet d'une discipline à part entière, en effet, comment caractériseriez-vous

...un **gaz à effet de serre** ? (*ils ont tous des durées de vie différentes*)

...la **toxicité** d'une substance ? (*celles-ci migrent plus ou moins rapidement, pour quelle exposition, etc.*)

...le caractère **critique** d'un matériau ? (*doit-on retenir pour critère les réserves ? Les ressources exploitables ? Les risques d'approvisionnement ? Y compris géopolitiques ?*)

# UN PEU D'ALGÈBRE

## Résolution

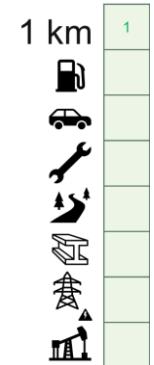
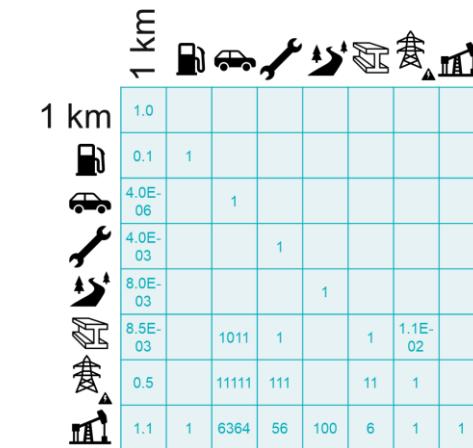
Inventaire des flux élémentaires :  $e = B(I - A)^{-1}y$

Résultats d'évaluation d'impact :  $d = Ce = CB(I - A)^{-1}y$

GES	
Énergie primaire	
Matériaux	

GES	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	charbon	gaz	aluminium	cuivre
Énergie primaire	1	28				
Matériaux			9.41	34.5		
					1.09e-09	0.001
					0.09	37

	1 km	fuel	car	wrench	screwdriver	saw	drill	powerline	mine
CO <sub>2</sub>	125	0.050	1000	10	10	2	0.400	0.100	
CH <sub>4</sub>		5e-4	1						0.005
charbon							0.400	0.200	
gaz								0.300	
aluminium			100						
cuivre		50							



$d$

$C$

$B$

$(I - A)^{-1}$

$y$

# ÉTUDE DE CAS

## Comparaison des impacts d'une voiture électrique et d'une voiture thermique

**Objectif: comparer les impacts environnementaux de deux véhicules**

**Questions à se poser**

### Phase 1

Pour quoi fait-on l'ACV ?

Quelle unité fonctionnelle ?

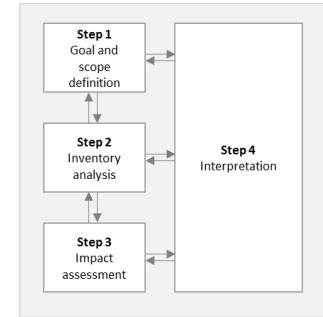
Comment délimiter notre système ?

Quels impacts environnementaux considérer ?

### Phase 2

Où trouver les données ?

Comment les organiser ?



### Phase 3

Calcul des impacts

### Phase 4

Quels résultats tirer de l'analyse ?

Propositions de visualisation

# ÉTUDE DE CAS

## Phase 1 : objectifs et champ d'application

### Approche

→ “cradle-to-grave” (du berceau à la tombe, c'est-à-dire en incluant la fin de vie post-consommation)

### Objectif

→ identifier l'option de mobilité individuelle la moins impactante entre véhicule diesel et véhicule électrique

### Contexte

→ France et Allemagne, en 2020, 2030, et 2040

### Analyse de sensibilité

→ masse du véhicule, taille de la batterie,

### Unité fonctionnelle

→ « 1 km parcouru en voiture »

# ÉTUDE DE CAS

## Phase 2 : analyse d'inventaire

# Où trouver les données ?

## **Composition d'un véhicule : données constructeur, littérature scientifique, base de données ACV**

## Production d'une batterie : données constructeur, littérature scientifique, base de données ACV

**Mix électrique** : données statistiques, portails de données (e.g. entsoe.com, app.electricitymaps.com)

## Émissions de CO<sub>2</sub> de la combustion de diesel : stœchiométrie !

# Organiser les données

## Construire la matrice A

# ÉTUDE DE CAS

## Phase 3 : évaluation d'impact

## Calcul des impacts

## Application directe de la formule

$$d = Ce = CB(I - A)^{-1}y$$

Les résultats n'ont pas grande valeur sans une phase d'interprétation poussée aidant à la comprehension !

indicateur		CO2	CH4	Énergie	Lithium	Cuivre	Acier	Aluminium
GES	kg CO2 eq.	1	28	0	0	0	0	0
Énergie primaire	MJ	0	0	1	0	0	0	0
Matériaux	kg Sb eq.	0	0	0	1E-05	1E-03	5E-08	1E-09

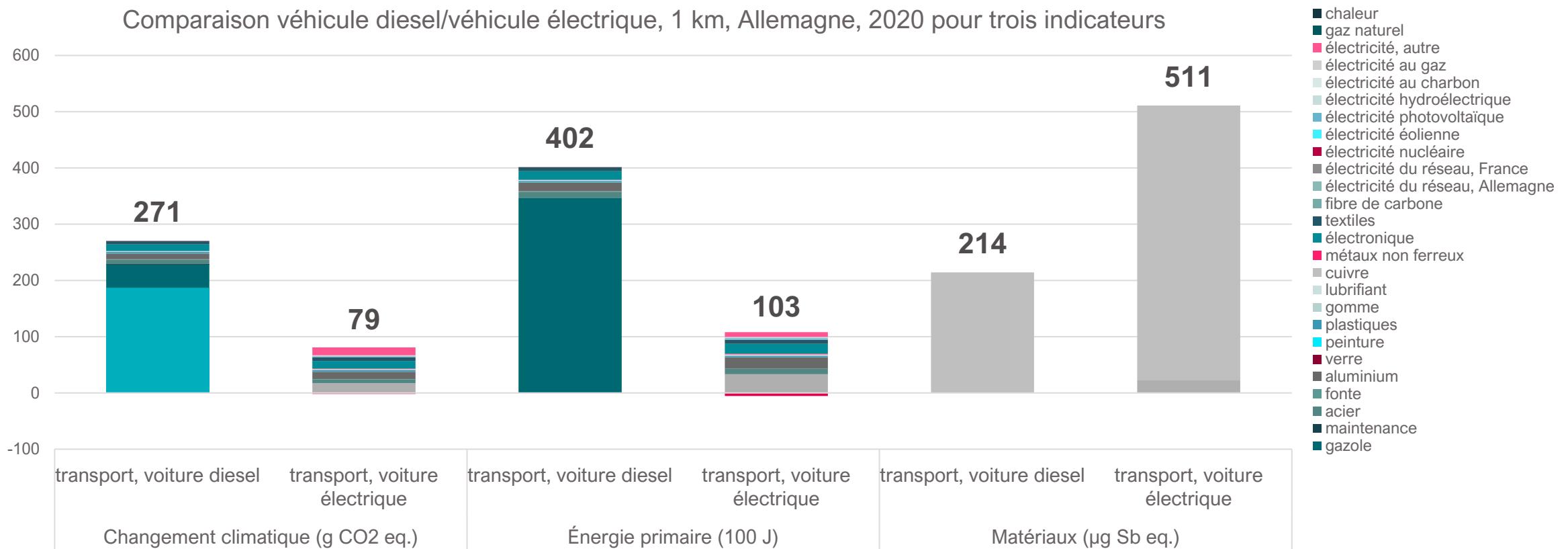


substance	unité	km transport, voiture diesel	km transport, voiture électrique
GES	kg CO2 eq.	0.273	0.20
Énergie primaire	MJ	4.041	2.35
Matériaux	kg Sb eq.	2.1E-07	5.1E-07



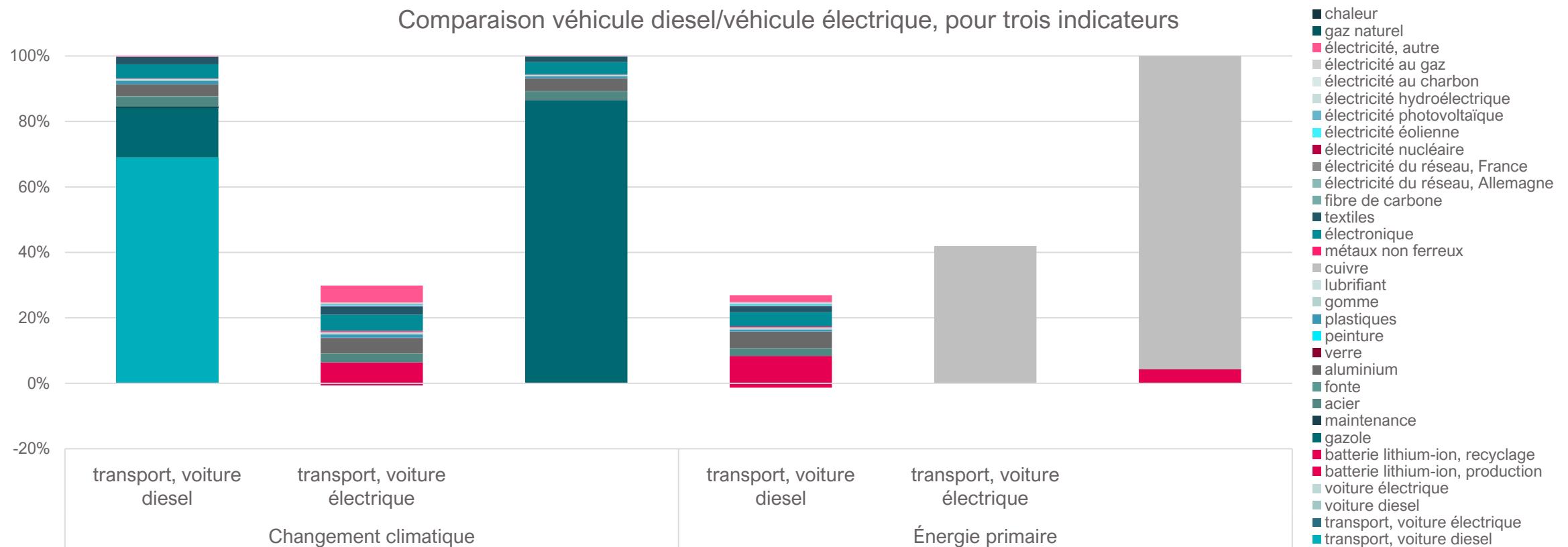
# ÉTUDE DE CAS

## Phase 4 : interprétation – résultats absolu



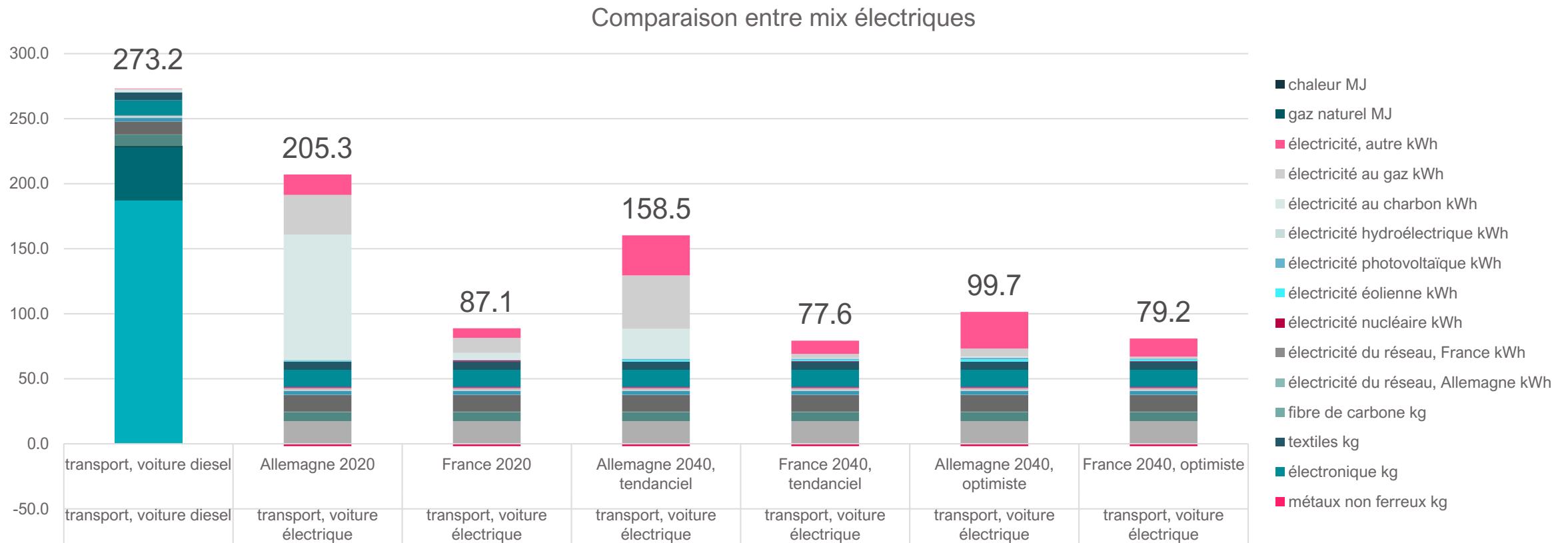
# ÉTUDE DE CAS

## Phase 4 : interprétation – résultats relatifs



# ÉTUDE DE CAS

## Phase 4 : interprétation – sensibilité mix électrique



# ÉTUDE DE CAS

## Phase 4 : interprétation

### Quelles analyses pouvons-nous proposer ?

Comment l'impact évolue en fonction du kilométrage

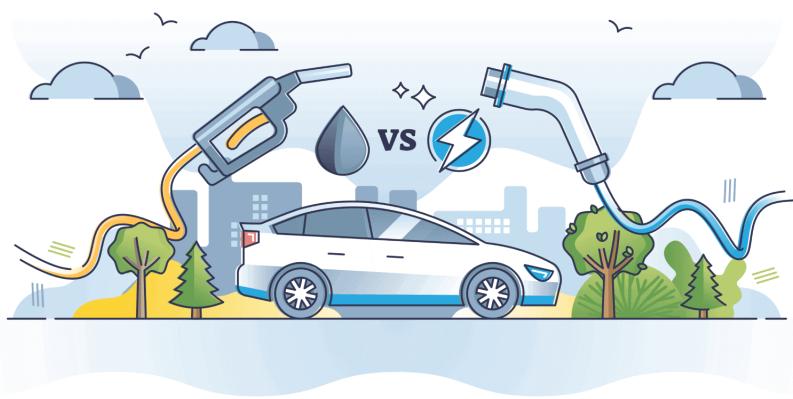
Comment l'impact évolue en fonction du poids du véhicule

La production du véhicule électrique ayant plus d'impact, après combien de kilomètres trouvons-nous un point de bascule vis-à-vis du véhicule diesel ?

Devrait-on prendre en compte un mix électrique qui évolue chaque année d'usage ?

Que se passe-t-il si la batterie doit être remplacée ?

Autres idées ?



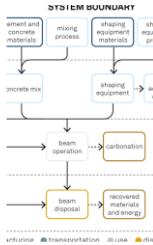
# 04 | CONCLUSIONS

# CONCLUSIONS

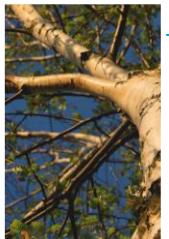
## Messages-clés



L'ACV est une méthode normalisée (ISO 14040)



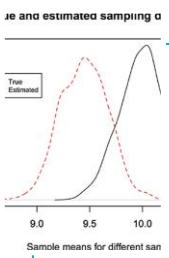
L'ACV est une méthode holistique et multicritère



Les principes de l'ACV sont utilisés pour des applications variées : comparaison entre produits/services/technologies, empreinte carbone individuelle, bilan carbone, FDES (EPDs)



La robustesse des résultats dépend principalement de la qualité des données d'entrée



Il est important de considérer les résultats comme des estimations (avec marge d'incertitude) plutôt que des valeurs exactes



L'ACV n'est pas une analyse de risque (incidents, accidents, ...)

# QUESTIONS

[thomas.gibon@list.lu](mailto:thomas.gibon@list.lu)