

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Introduction, applications

Thomas Gibon

Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)

ENSAE – Enjeux environnementaux (OMI448)

5 avril 2024



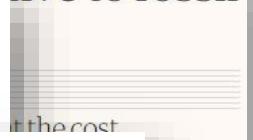
LUXEMBOURG
INSTITUTE OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY



PLAN DU COURS

01	Introduction à la méthode ACV et à son historique	13h30-14h10
02	Principes fondamentaux de l'ACV	14h15-14h45
03	Étude de cas	14h50-15h20
04	Conclusion	15h20-15h30

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
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 CO₂ 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

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

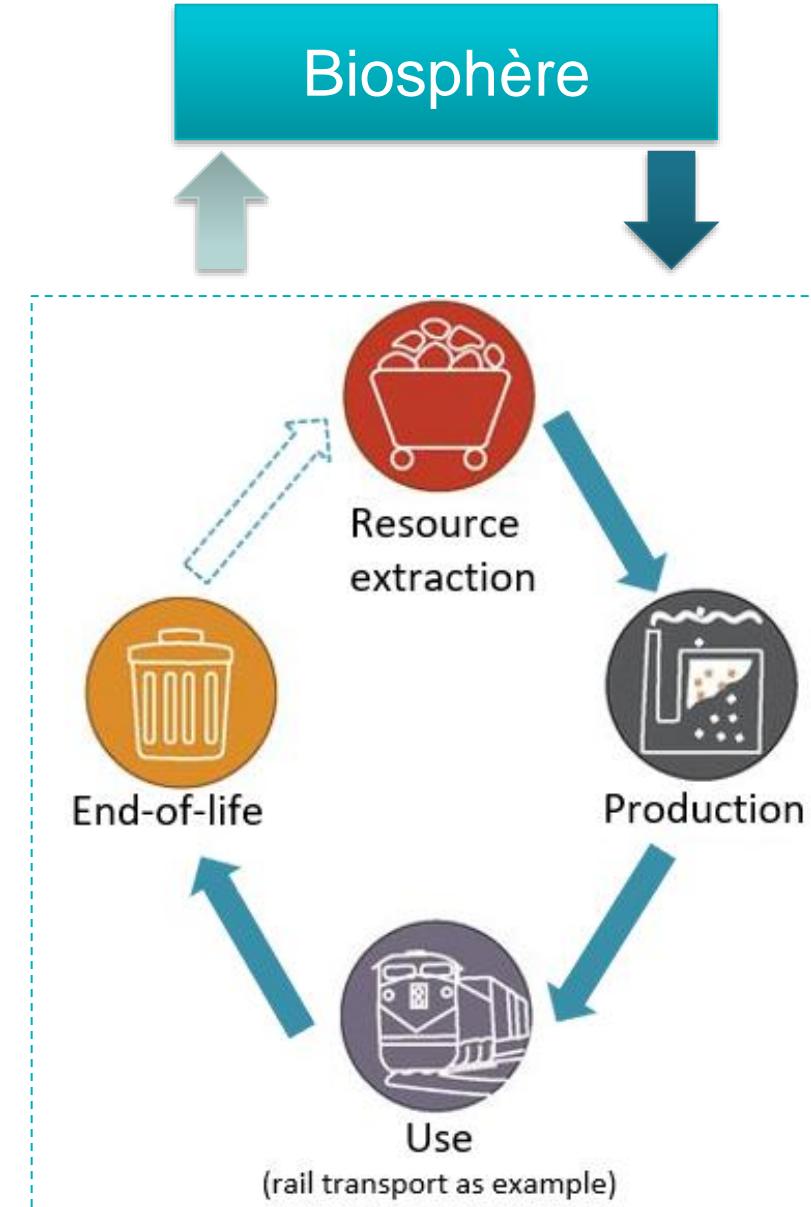


Figure: adapté de Hellweg & Mila i Canals (2014)

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

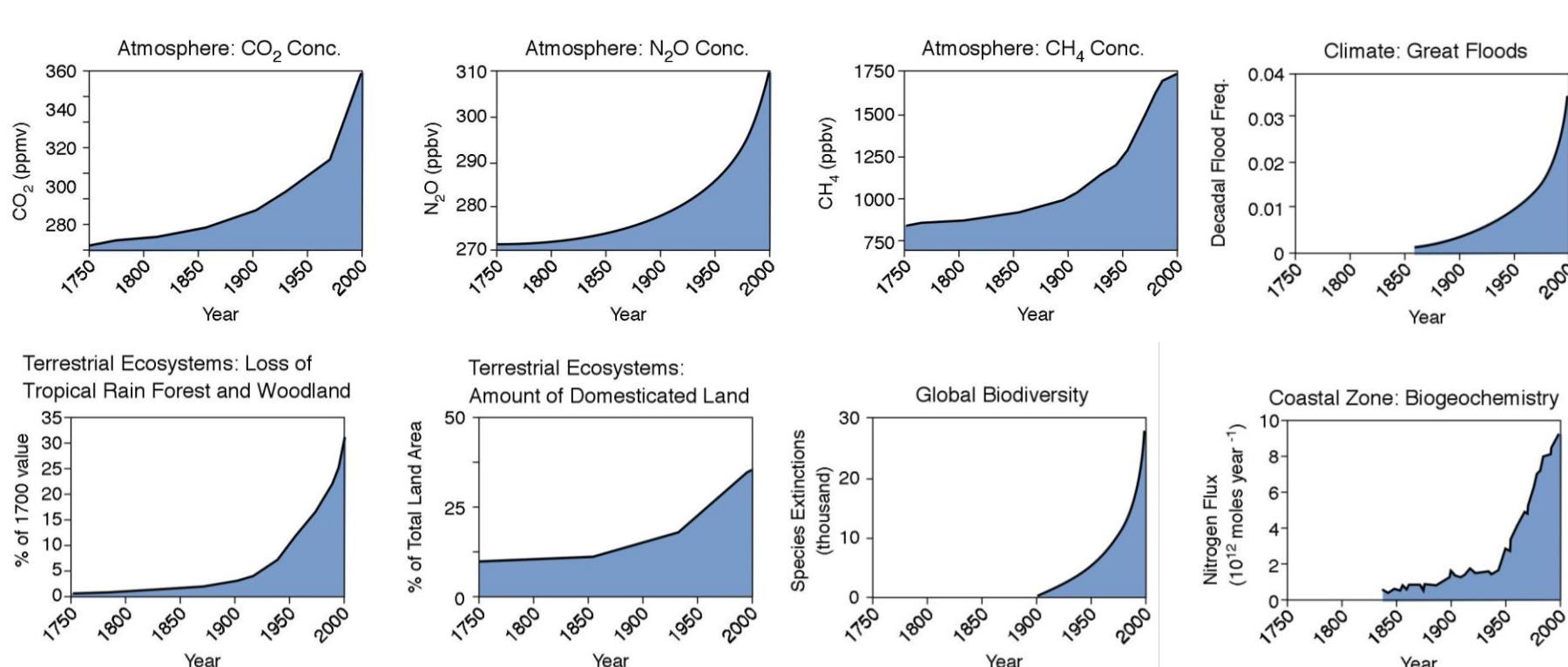
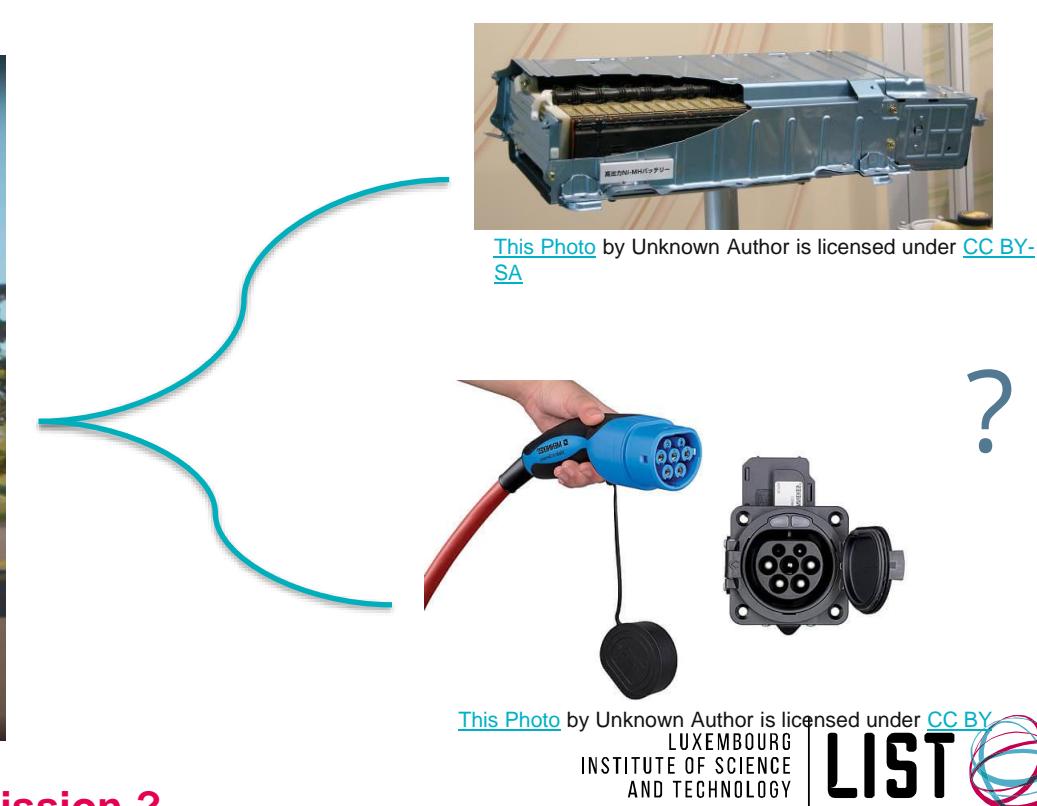


Figure: Steffen et al. 2004

POURQUOI L'ACV?

Transfert de pollution le long de la chaîne de valeur

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



POURQUOI L'ACV?

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

Équiper des centrales à charbon de dispositifs de captage du CO₂ permet de réduire les émissions de CO₂, 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-

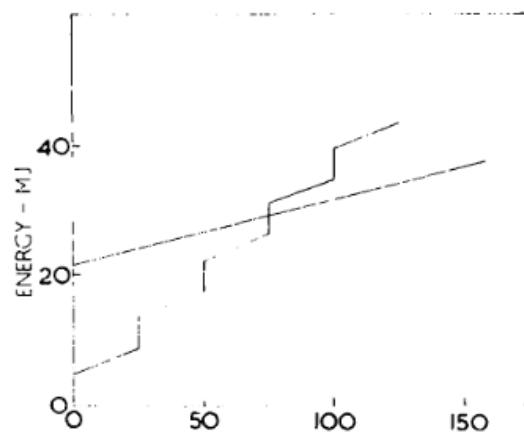


Fig. 5

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

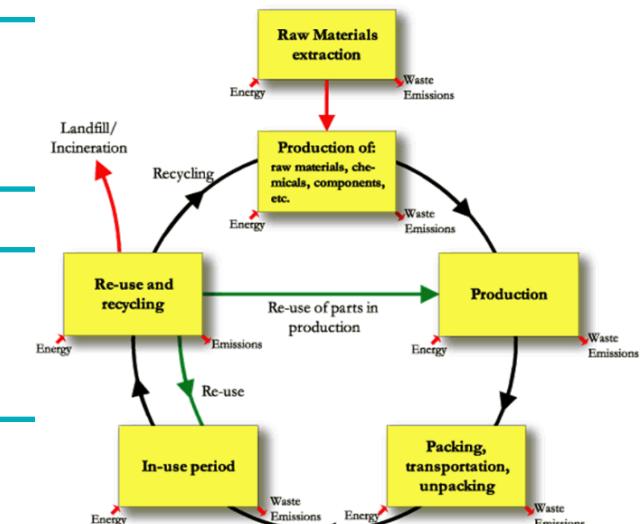
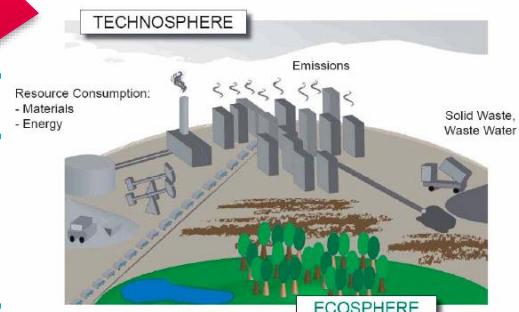
- Transition lente de l'*approche site* à l'*approche produit*
- Gestion de l'énergie, des matières premières, et des polluants
- Absence d'une vision holistique** : accent limité sur la chaîne d'approvisionnement et le traitement en fin de vie
- Focus sur seulement quelques polluants**, quelques effets 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 CO₂ 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 CO₂ 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 !

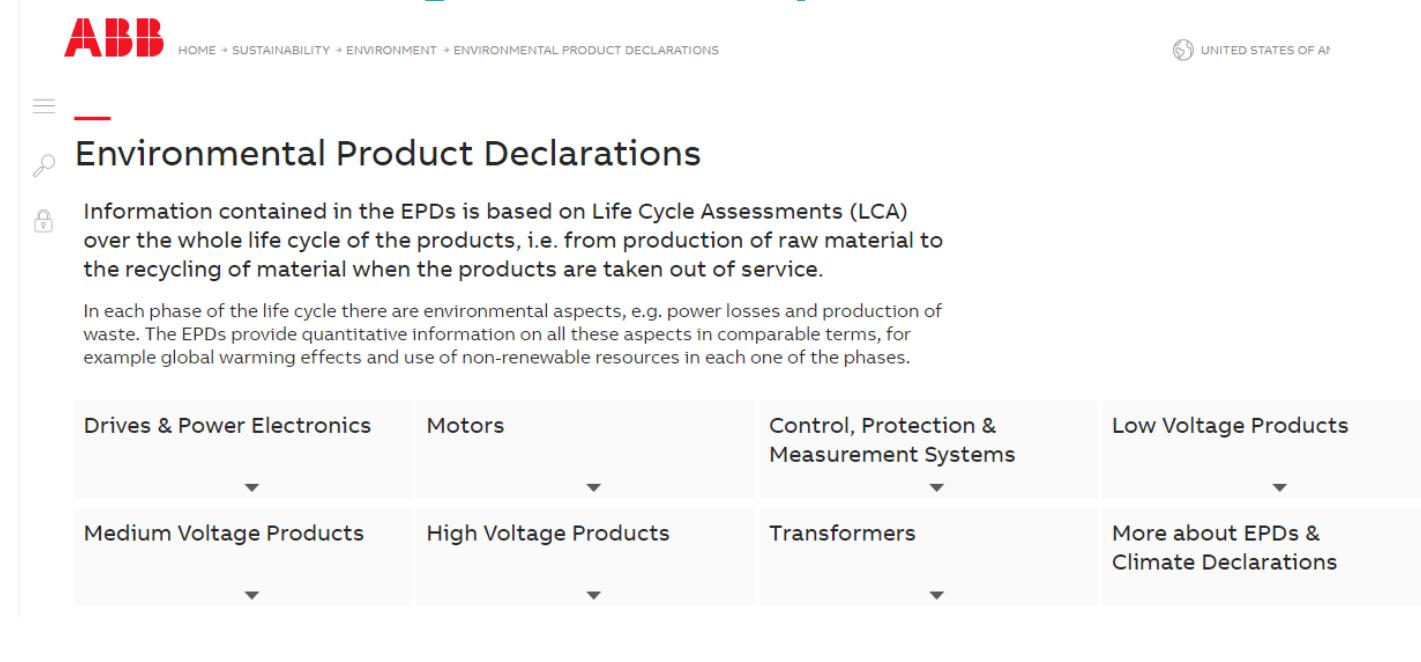
UTILISATION DE L'ACV

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



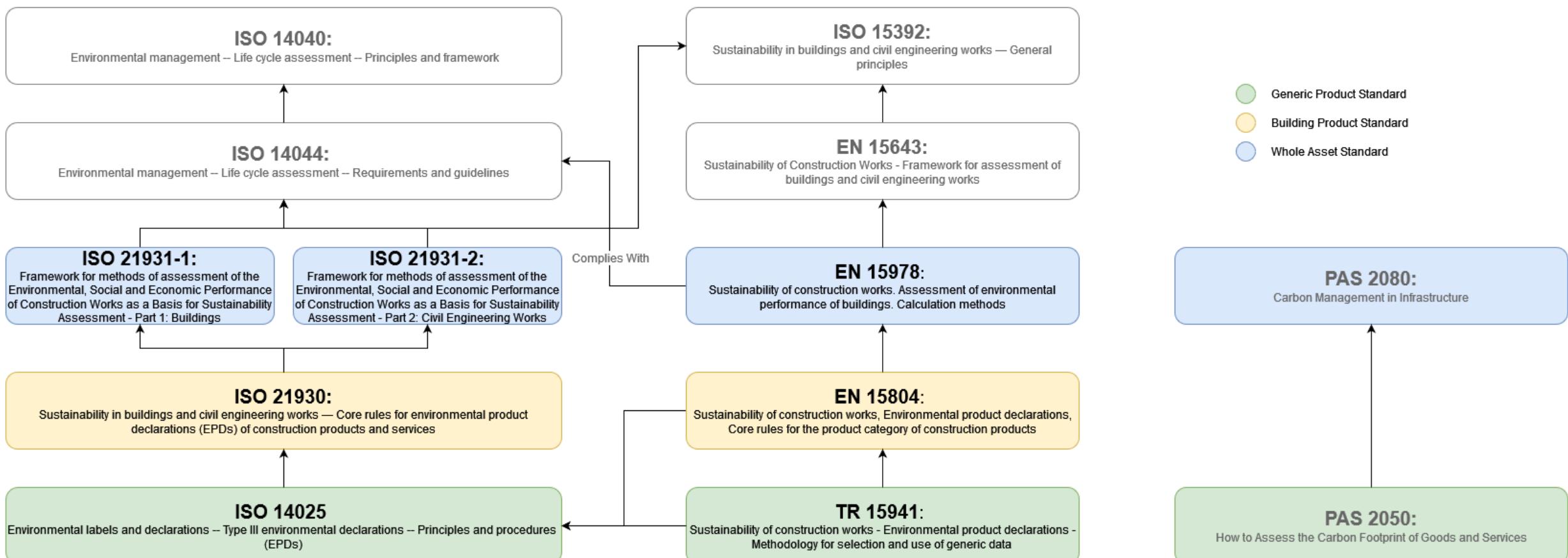
The screenshot shows the ABB website's Environmental Product Declarations section. At the top, there is a navigation bar with links to Home, Sustainability, Environment, and Environmental Product Declarations. Below this, a search icon and a menu icon are visible. The main content area has a title "Environmental Product Declarations" with a magnifying glass icon. A detailed description follows: "Information contained in the EPDs is based on Life Cycle Assessments (LCA) over the whole life cycle of the products, i.e. from production of raw material to the recycling of material when the products are taken out of service." Another paragraph explains: "In each phase of the life cycle there are environmental aspects, e.g. power losses and production of waste. The EPDs provide quantitative information on all these aspects in comparable terms, for example global warming effects and use of non-renewable resources in each one of the phases." 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

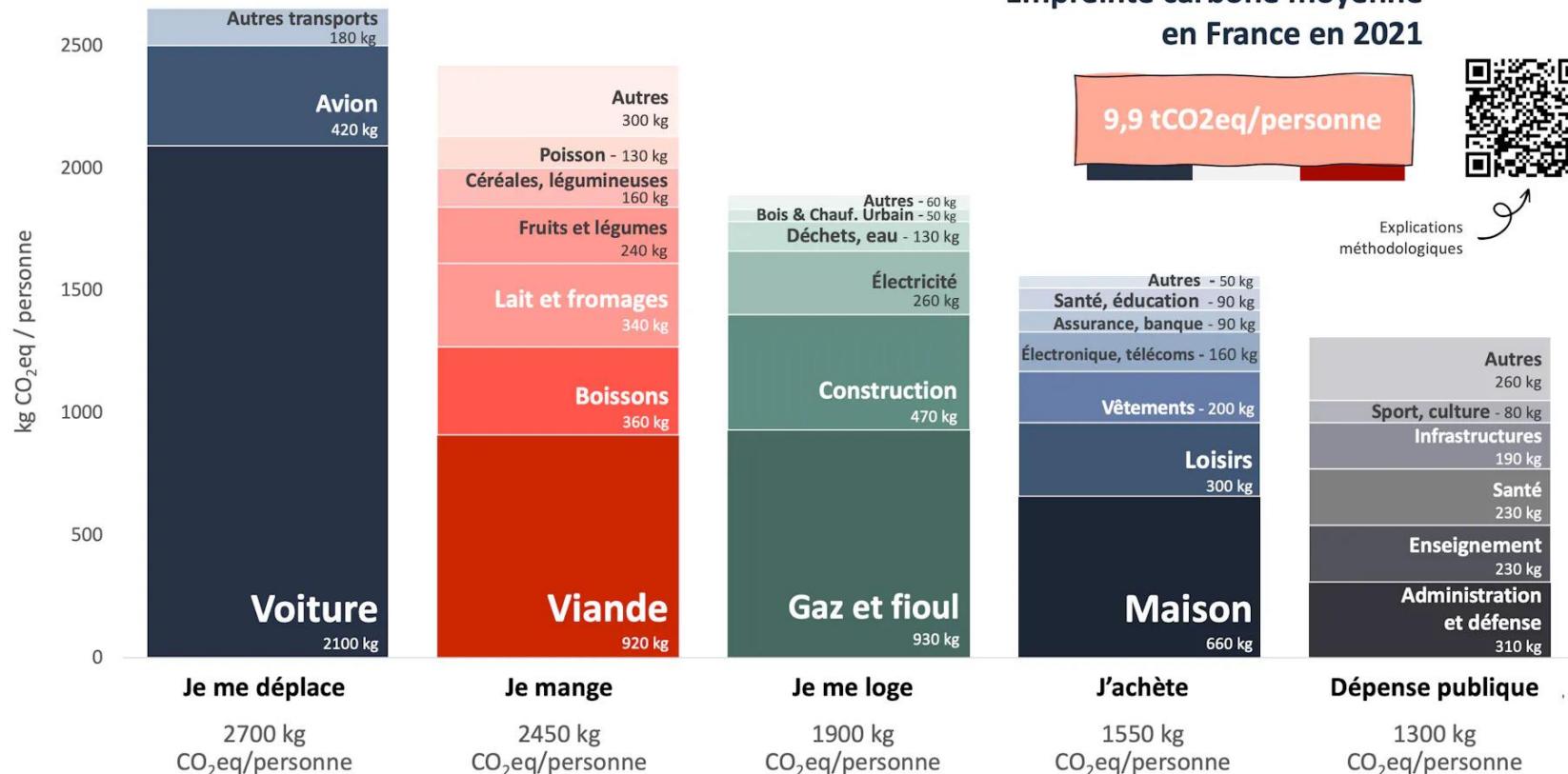
Fiches de déclaration environnementales et sanitaires

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 tCO₂eq/personne



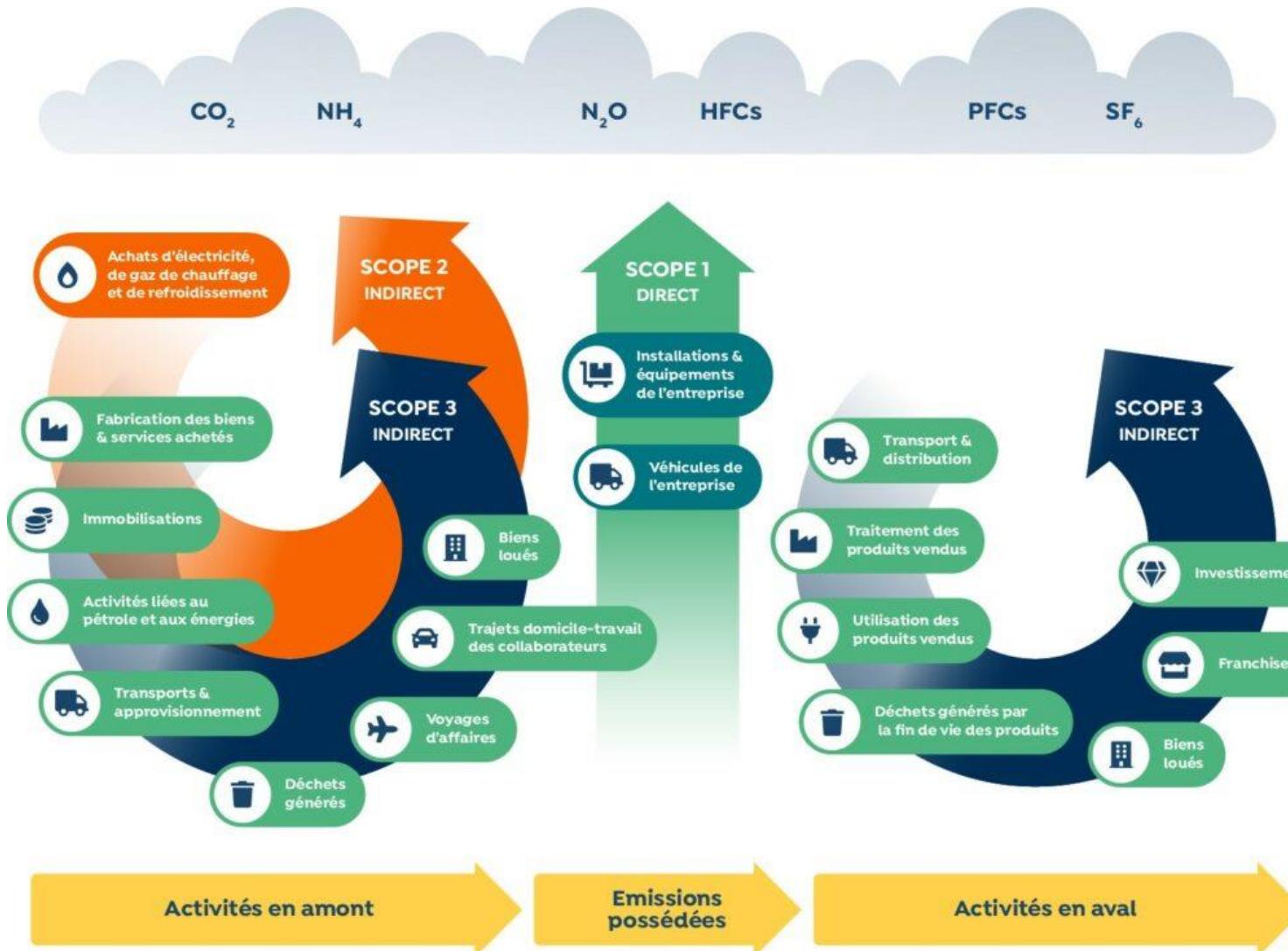
Explications
méthodologiques



Gaz inclus : CO₂ (hors UTCATF France), CH₄, N₂O, HFC, SF₆, PFC, H₂O (trainées de condensation).
Source : MyCO2 par Carbone 4 d'après le ministère de la Transition écologique, le Haut Conseil pour le Climat, le CITEPA, Agribalyse V3 et INCA 3.

UTILISATION DE L'ACV

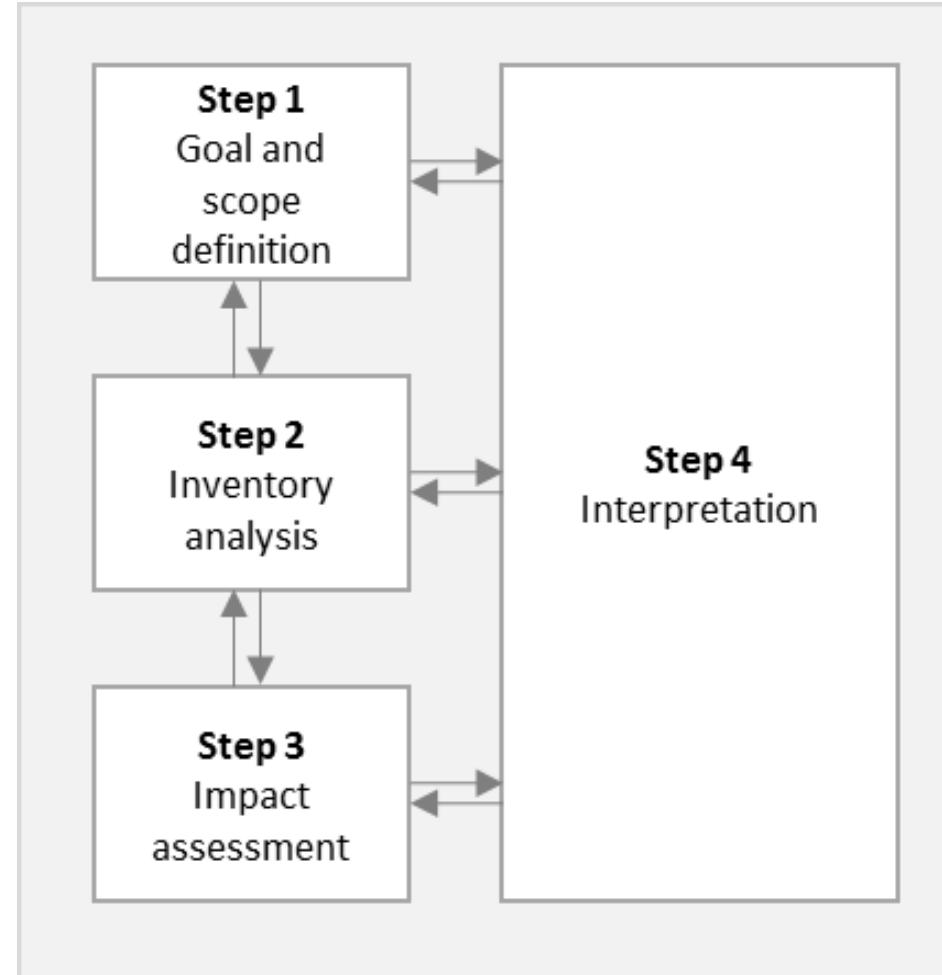
Bilan carbone d'une entreprise



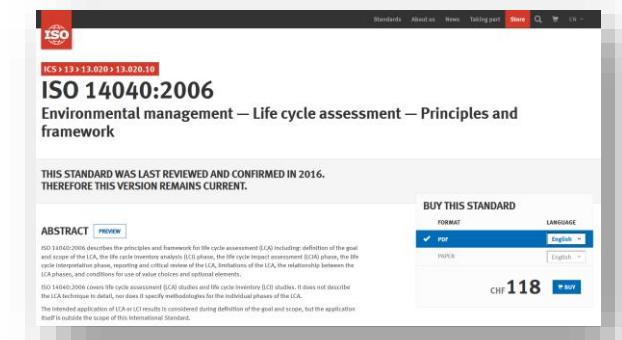
02 | PRINCIPES FONDAMENTAUX DE L'ACV

L'ACV EST UN PROCESSUS ITÉRATIF

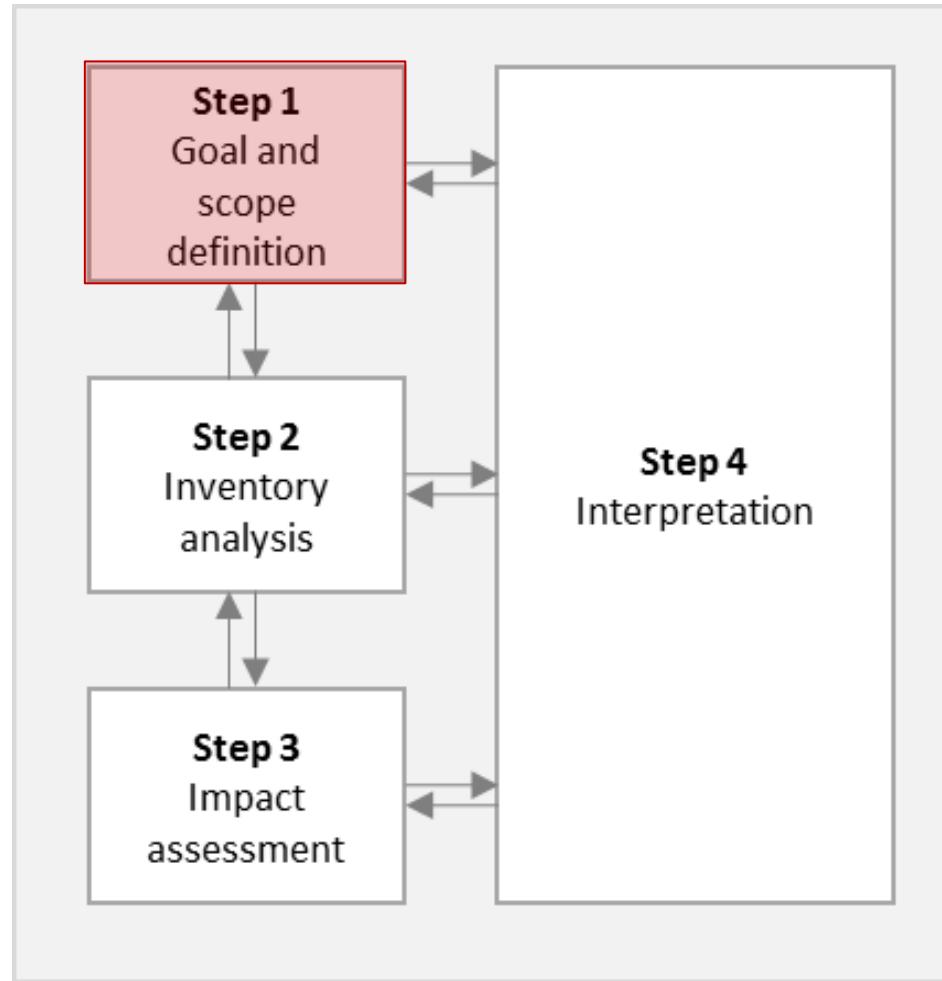
4 phases



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

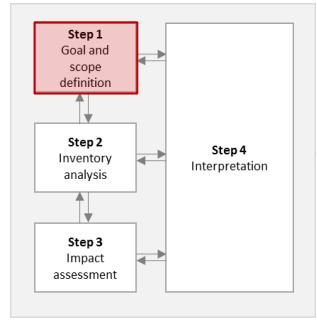
La définition du champ d'application doit couvrir :

Le produit à étudier

L'« unité fonctionnelle »

Les types d'impact sur l'environnement à étudier

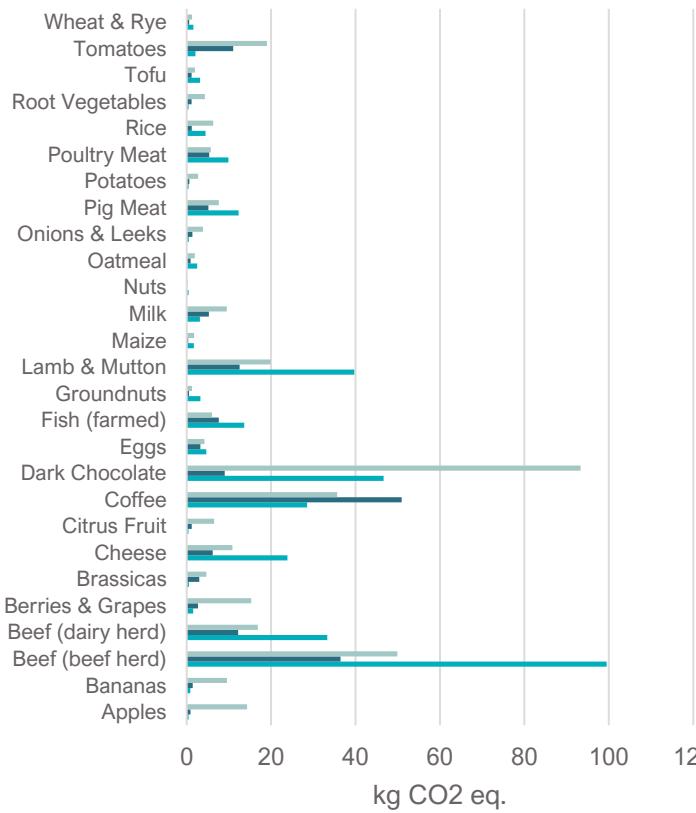
Limites du système (peut être en relation avec des systèmes techniques, des frontières géographiques, du temps, etc.)



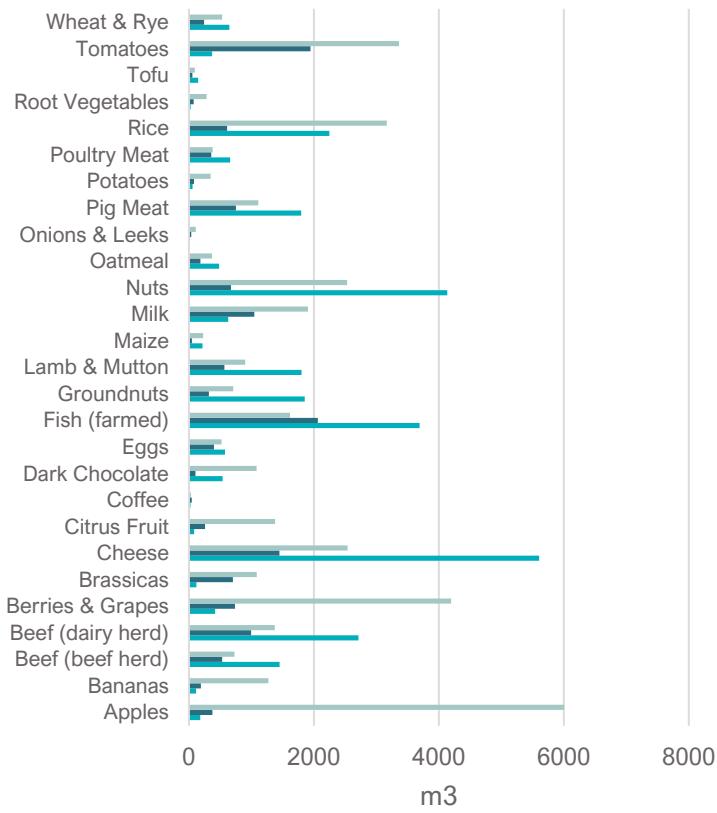
PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION

Choix de l'unité fonctionnelle – exemple de l'empreinte de l'alimentation

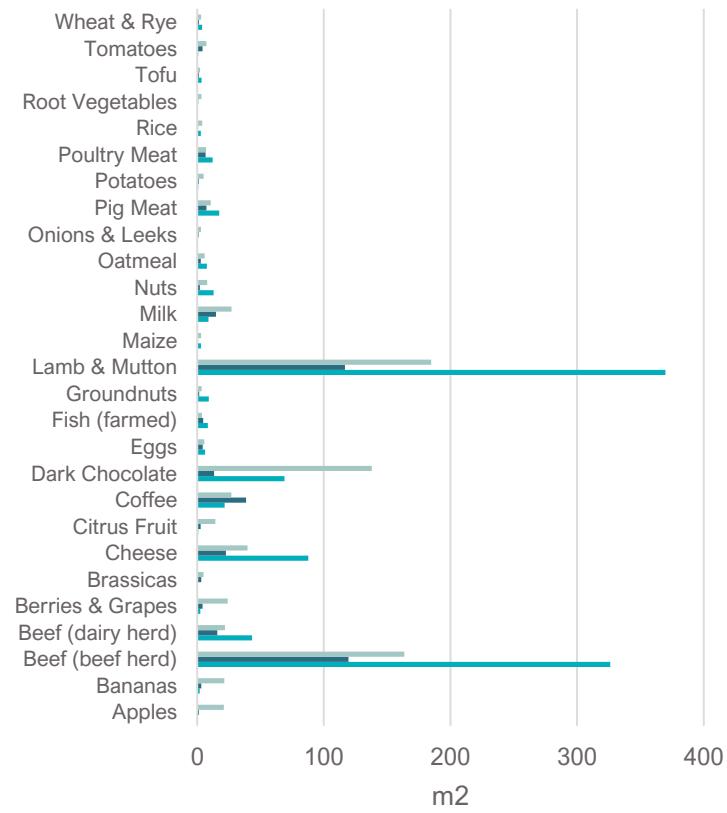
Émissions de GES par kg, 1000 kcal, et 100 g protéines



Utilisation d'eau par kg, 1000 kcal, et 100 g protéines



Occupation des sols par kg, 1000 kcal, et 100 g protéines



■ kg CO2 eq./100 g protéines ■ kg CO2 eq./1000 kcal

■ kg CO2 eq./kg

<https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>

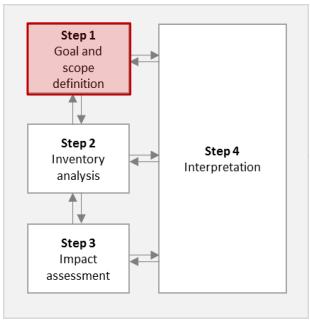
■ m3/100 g protéines ■ m3/1000 kcal ■ m3/kg

■ m2/100 g protéines ■ m2/1000 kcal ■ m2/kg

AND TECHNOLOGY |



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 »

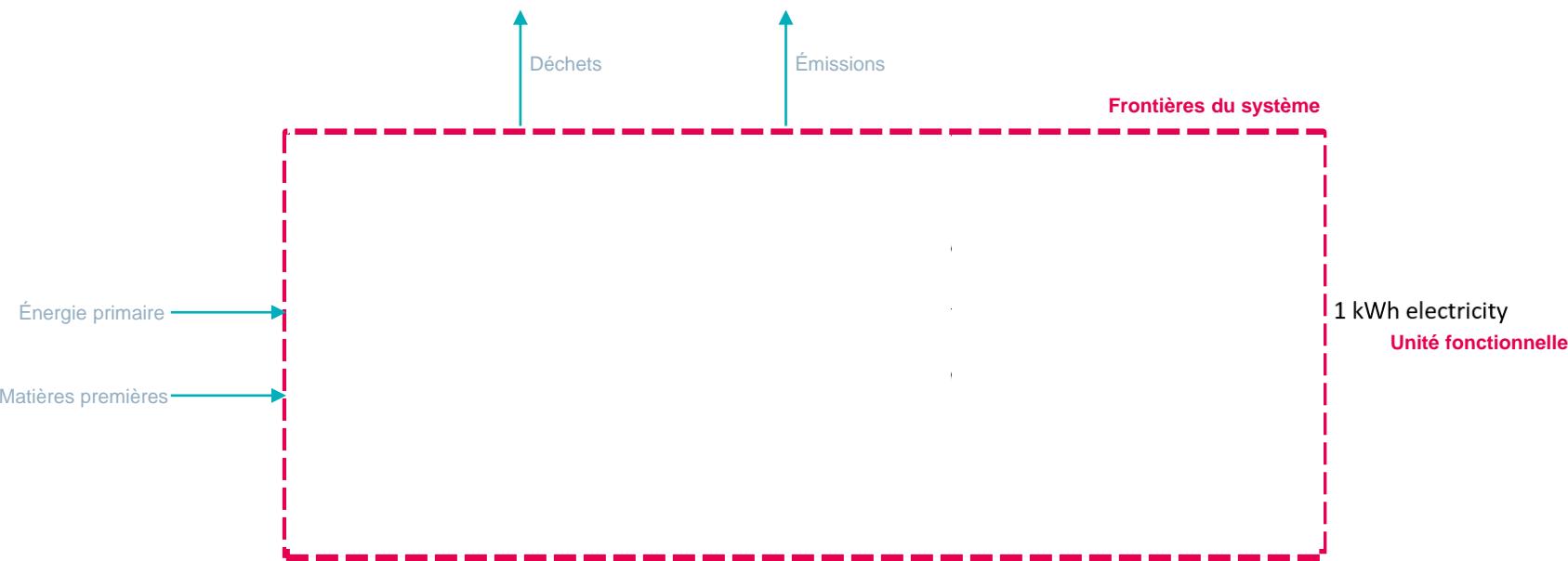
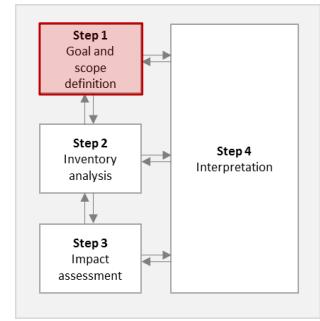
« L'unité fonctionnelle est 1 kWh d'électricité fournie à un consommateur français »

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

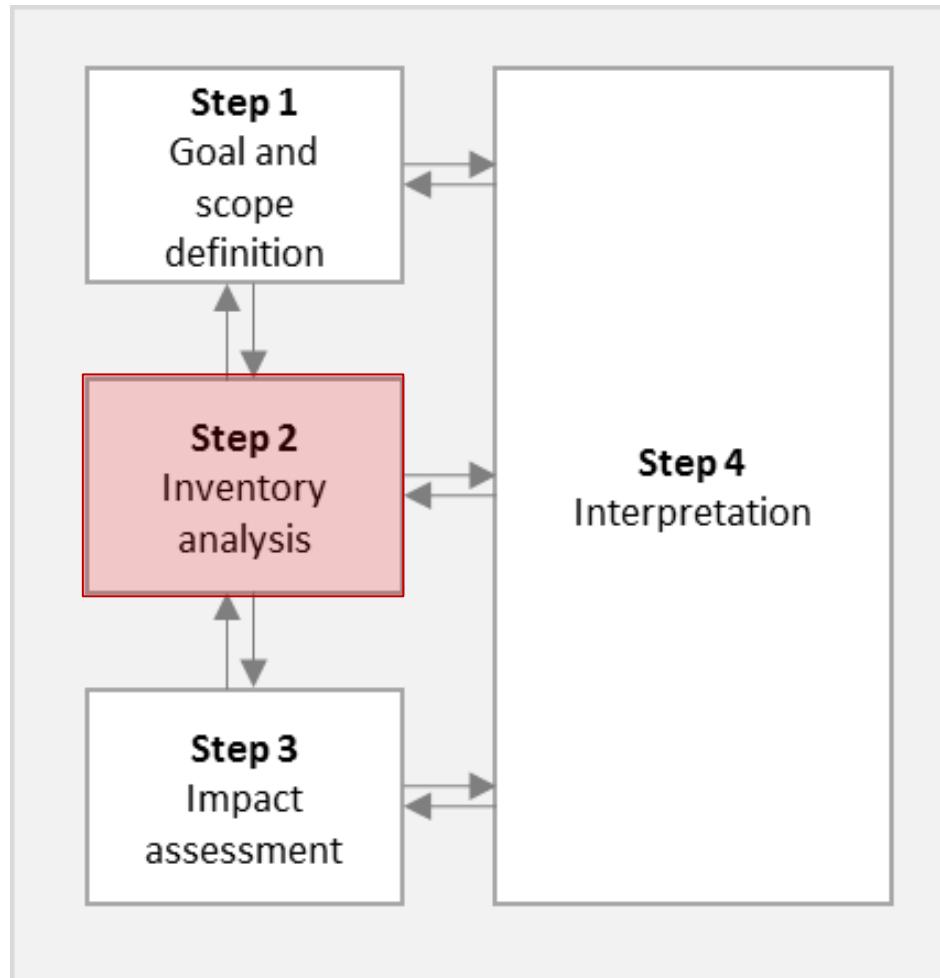


PHASE 1 : OBJECTIF ET CHAMP D'APPLICATION

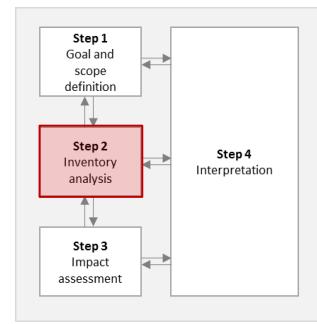
Les frontières du système



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

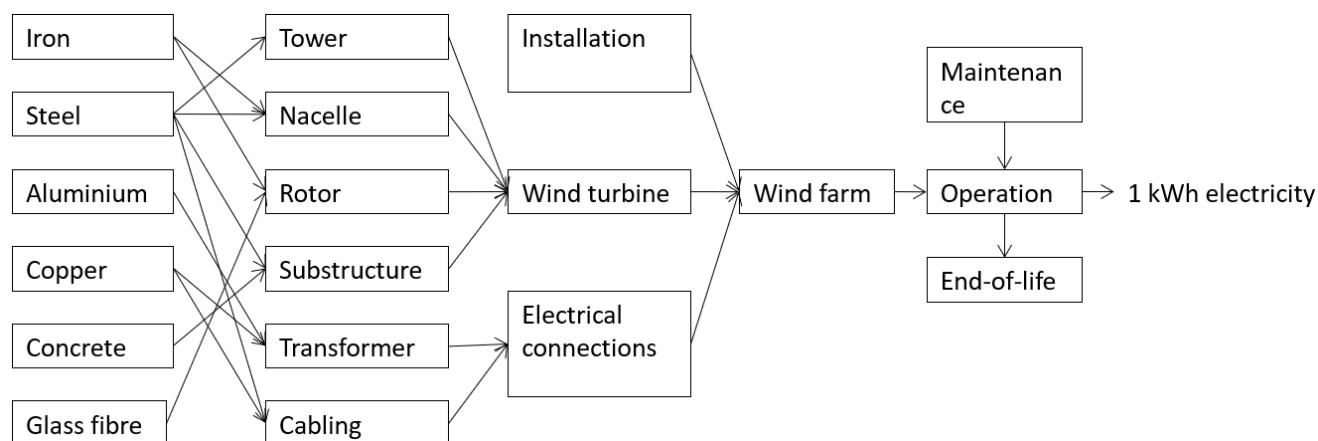
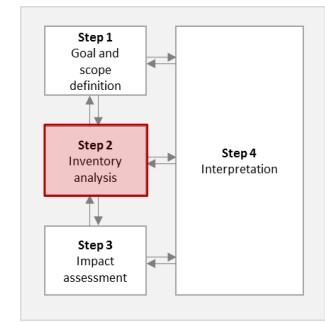


Table S3. Breakdown of components and materials of one wind turbine

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	
	Cast iron	42 t	
	High-alloy steel	42 t	
	Glass-reinforced plastics	10 t	
	Cast iron	35 t	
Nacelle	Generator	Low-alloy steel	19 t
	Gearbox	High-alloy steel	27 t
	Housing	Low-alloy steel	4.8 t
	Main frame	Copper	7.8 t
	Main shaft	Electrical steel	18 t
Tower	Transformer	Low-alloy steel	350 t
	Tubular steel	Aluminum	2.6 t
	Tower internals	Copper	1.3 t

Table: Arvesen et al.
2013

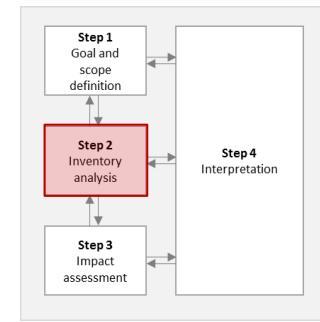
PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

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

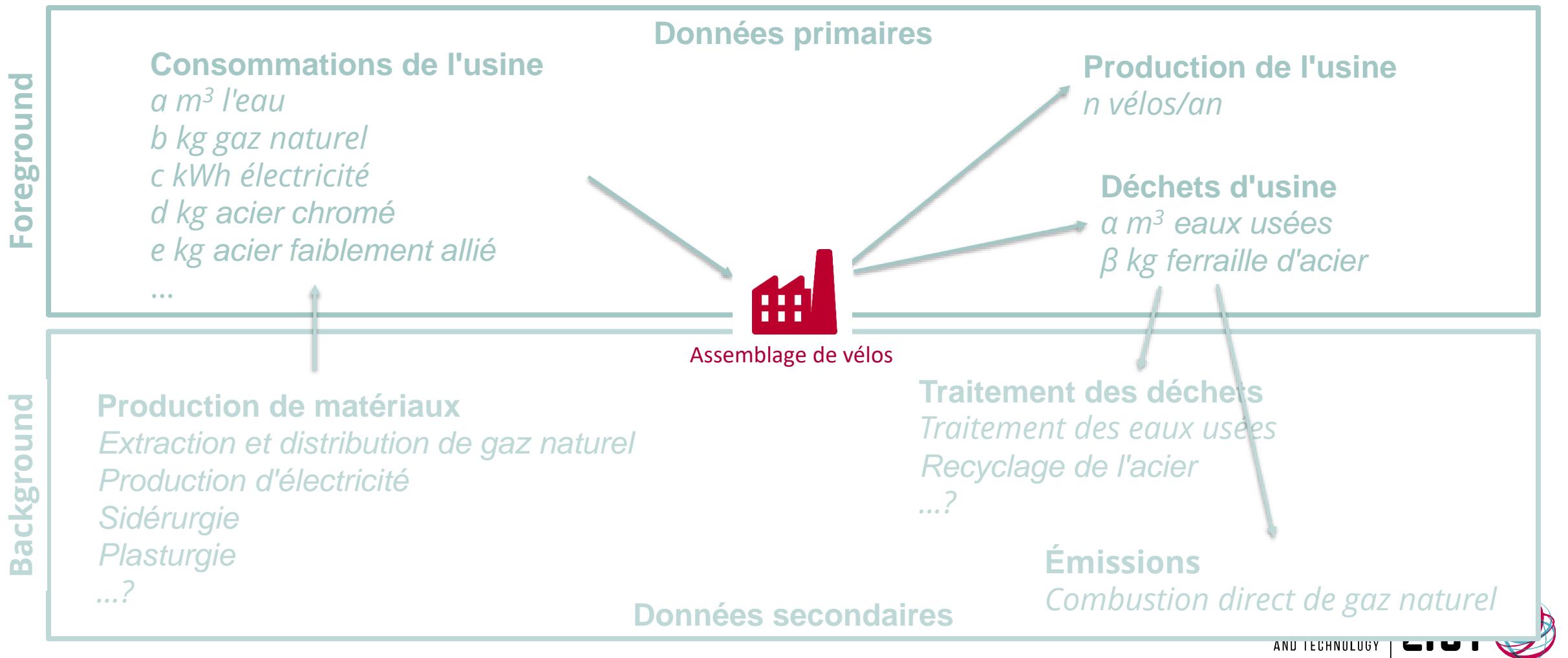


per 1 MWh		Windpower
(a) Benzo(a)pyrene	kg	1.1 E-6
(a) CO	kg	3.4 E-1
(a) CO2	kg	4.0 E+1
(a) Hg	kg	2.2 E-6
(a) Methan	kg	1.5 E-1
(a) NMVOC	kg	8.0 E-2
(a) Nox	kg	1.1 E-1
(a) PAH	kg	1.7 E-4
(a) particulate matter	kg	1.1 E-1
(a) SO2	kg	1.5 E-1

Table: Arvesen et al. 2013

PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

Données primaires vs. données secondaires



PHASE 2 : ANALYSE D'INVENTAIRE

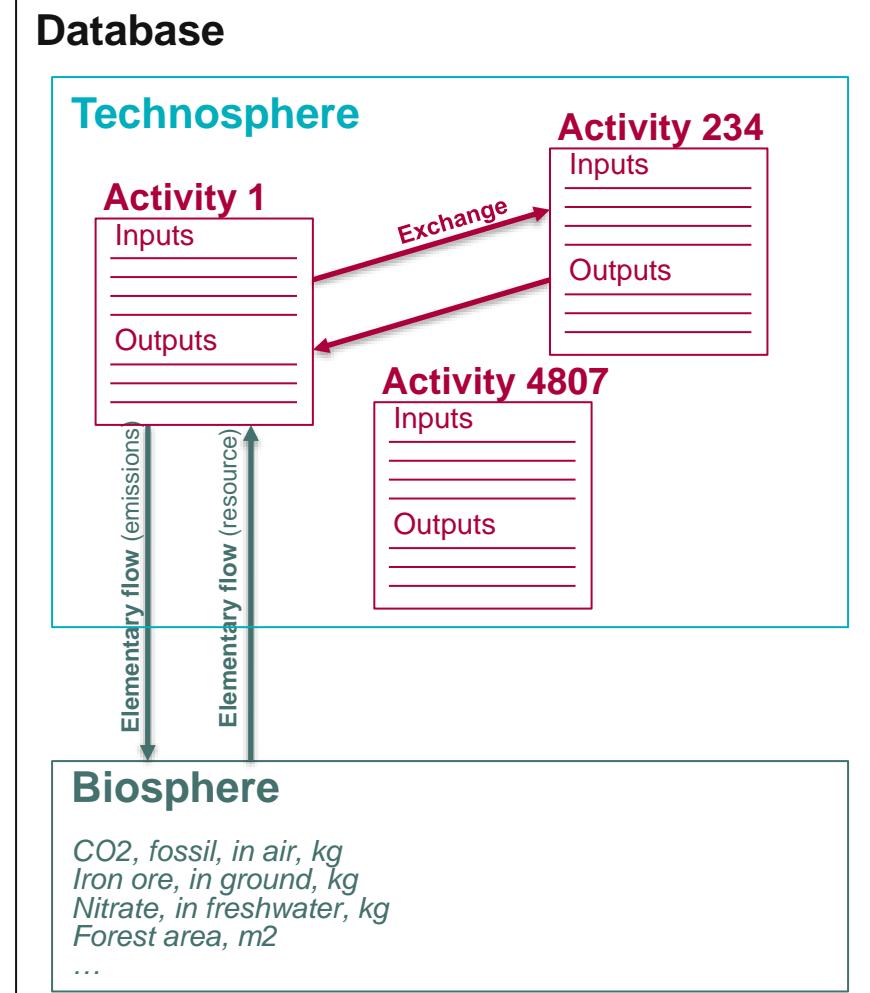
Bases de données

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)



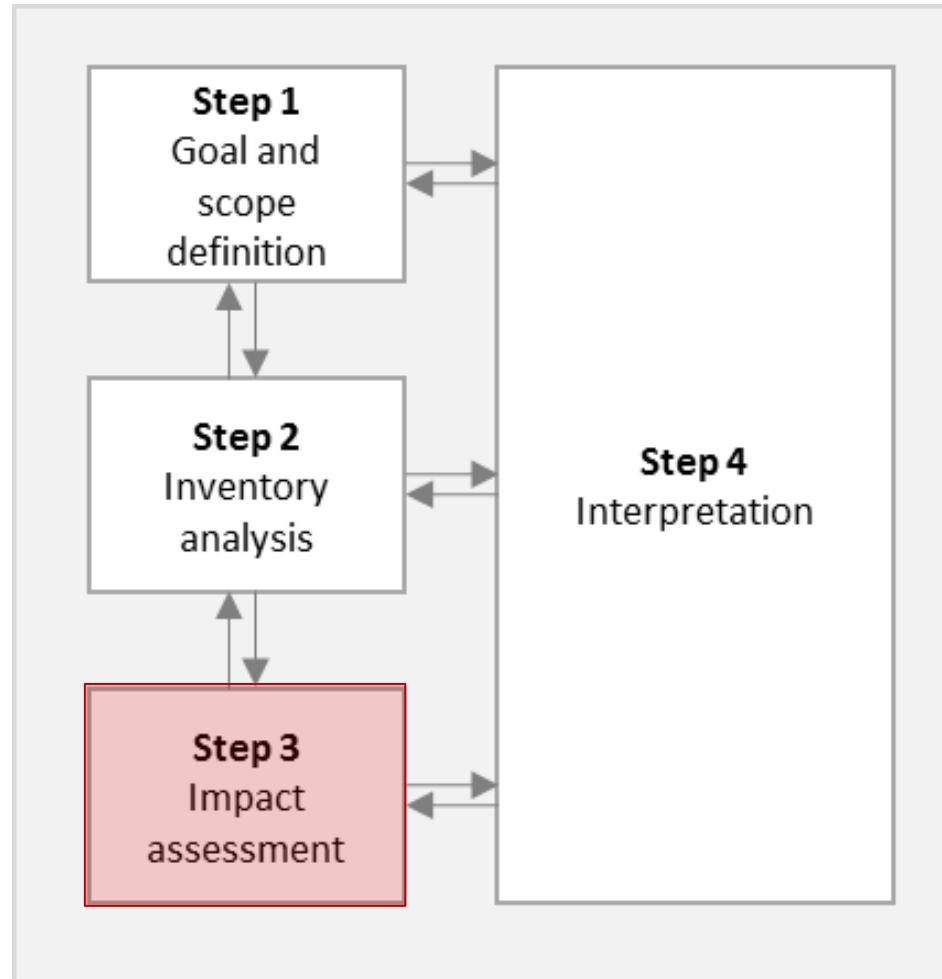
Name: US LCI database
Provider: National Renewable Energy Laboratory (NREL, US)



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 ₂ 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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion resistance • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ water • m³ groundwater 	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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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) ²⁶	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



²⁴ 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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion resistance • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ water • m³ groundwater 	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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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) ²⁶	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



²⁴ 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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion resistance • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ water • m³ groundwater 	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

²⁴ 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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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) ²⁶	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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion resistance • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ water • m³ groundwater 	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III

²⁴ 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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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) ²⁶	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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion resistance • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ water • m³ groundwater 	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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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) ²⁶	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



²⁴ 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 ²³	Radiative forcing as global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ 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 ²³⁵	kBq U ²³⁵ 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

²³ 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"> • Soil quality index²⁴ • Biotic production • Erosion • Mechanical filtration • Groundwater replenishment 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionless (pt) • kg biotic production • kg soil • m³ groundwater 	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 ³ world eq	Available WAtErEMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Resource use ²⁵ , 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



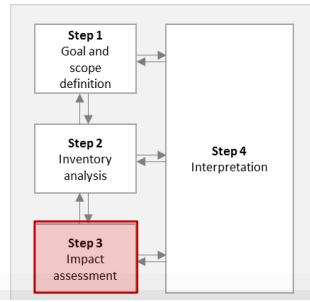
INSTIT
A

²⁴ 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)

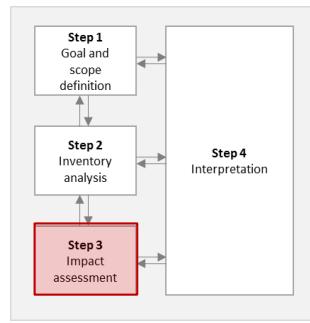
<input checked="" type="checkbox"/> Hide uncertainty columns	<input type="checkbox"/> Edit Characterization Factors	Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
29	Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	('natural resource', 'in ground')	1.09e-09	kilogram	Undefined or unknown uncertainty	
100	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)

<input checked="" type="checkbox"/> Hide uncertainty columns	<input type="checkbox"/> 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)

CO₂ to air
NO_x 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

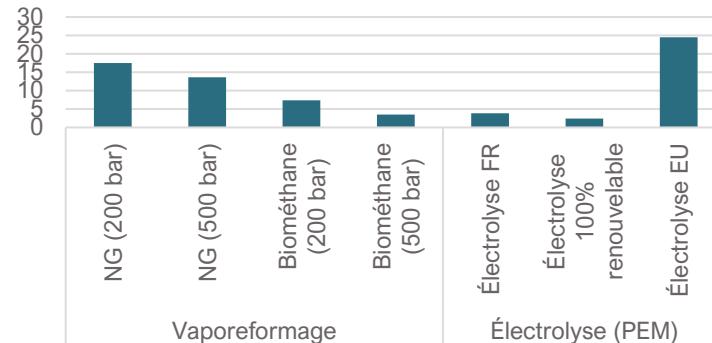
L'électrolyse (production d'hydrogène à partir d'eau) émet moins de CO₂, mais demande plus de matériaux – comment arbitrer ?

Gaz à effet de serre

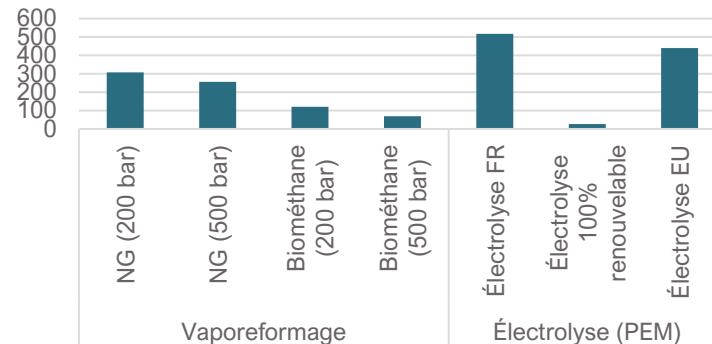
Ressources énergétiques

Ressources minérales et métalliques

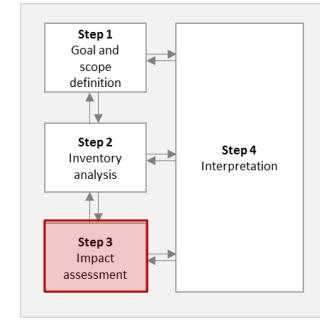
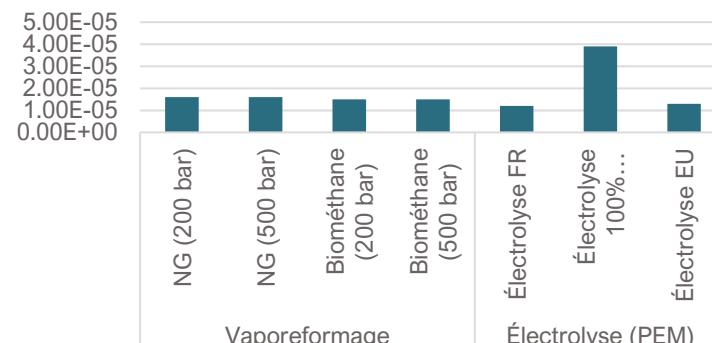
Émissions de gaz à effet de serre de la production d'hydrogène (kg CO₂ eq./kg H₂)



Ressources énergétiques requises pour la production d'hydrogène (MJ/kg H₂)



Ressources abiotiques (minéraux, métaux) requises pour la production d'hydrogène (kg Sb eq./kg H₂)



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 ₂ 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 ^(a)	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 ⁺ 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 ^(b)	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 ³ water eq of deprived water	7.91E+13 ^(b)	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

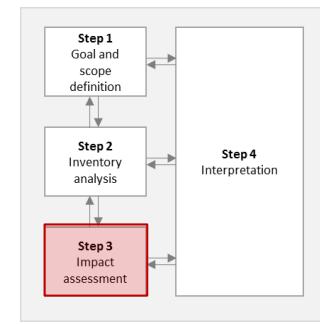
* World population used to calculate the NF per person: 6895889018 people. Source: UNDESA (2011)

(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	12.90	0.87	11.18	21.06
Ozone depletion	5.58	0.60	3.35	6.31
Human toxicity, cancer effects	6.80	0.17	1.13	2.13
Human toxicity, non-cancer effects	5.88	0.17	0.98	1.84
Particulate matter	5.49	0.87	4.76	8.96
Ionizing radiation, HH	5.70	0.47	2.66	5.01
Photochemical ozone formation, HH	4.76	0.53	2.54	4.78
Acidification	4.94	0.67	3.29	6.20
Eutrophication, terrestrial	2.95	0.67	1.97	3.71
Eutrophication, freshwater	3.19	0.47	1.49	2.80
Eutrophication, marine	2.94	0.53	1.57	2.96
Ecotoxicity freshwater	6.12	0.17	1.02	1.92
Land use	9.04	0.47	4.22	7.94
Water use	9.69	0.47	4.52	8.51
Resource use, mineral and metals	6.68	0.60	4.01	7.55
Resource use, fossils	7.37	0.60	4.42	8.32

PHASE 3 : ÉVALUATION D'IMPACT

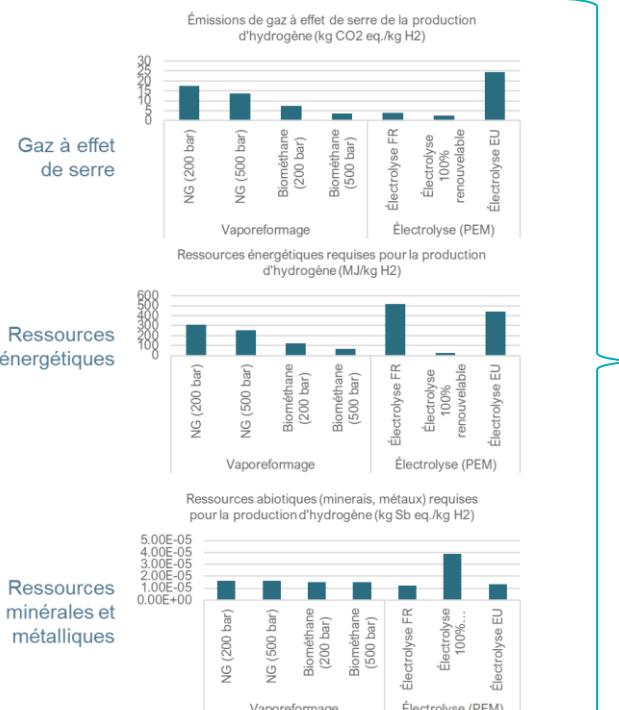


Normalisation et pondération

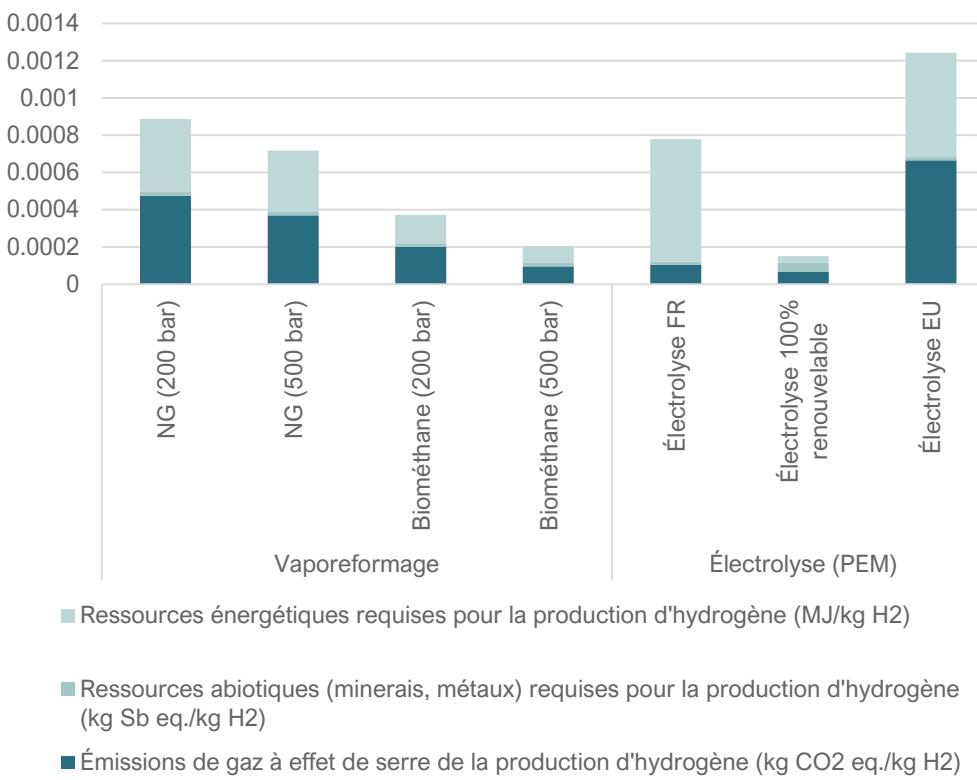
Il est possible de normaliser les résultats par rapport à une référence donnée.

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

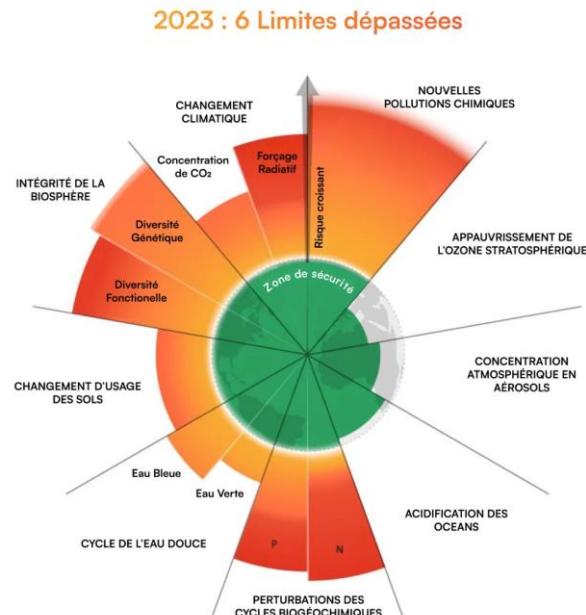


NORMALISATION ET PONDÉRATION

Normalisation

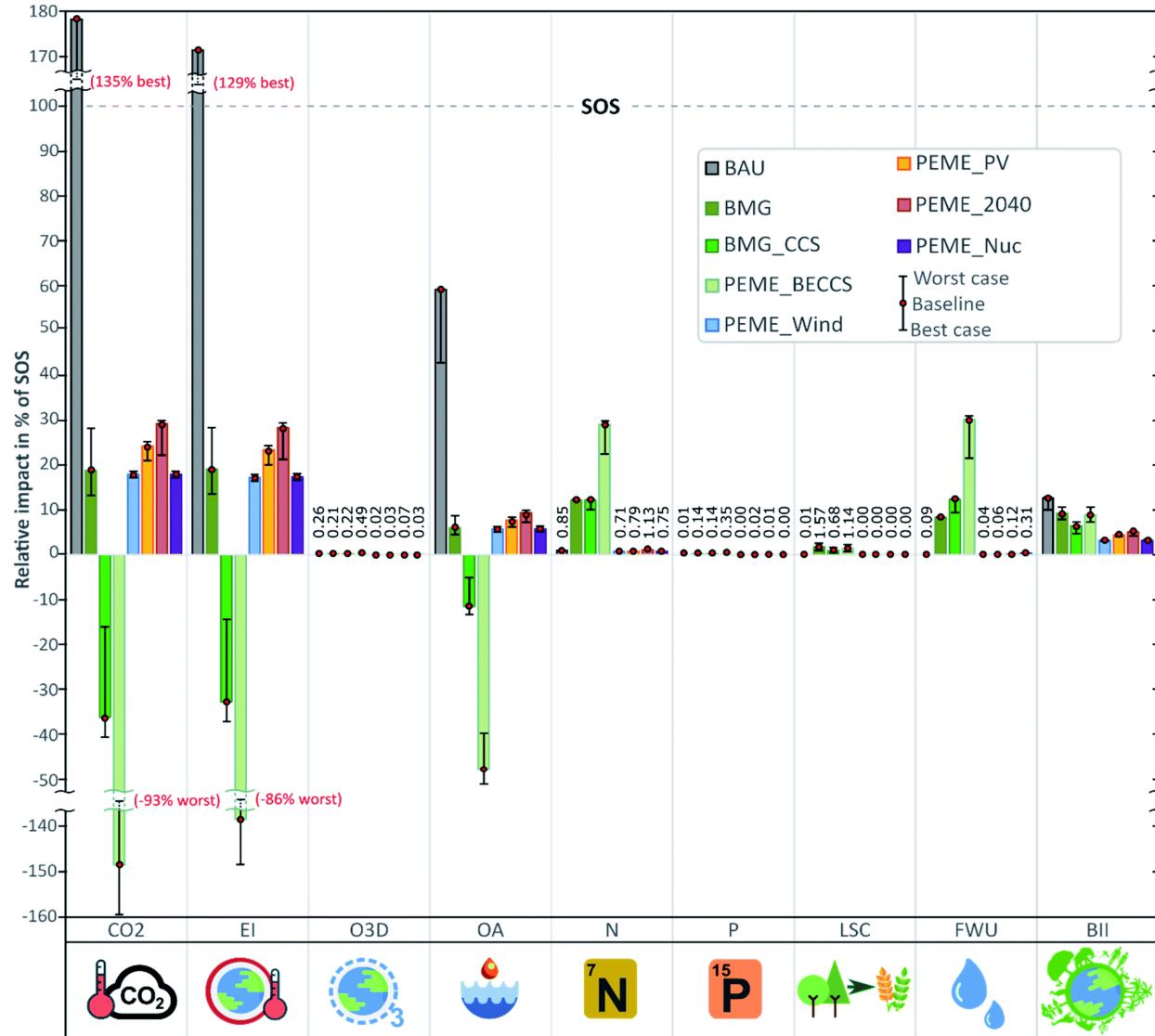
Récemment, l'idée de limites planétaires a fait son apparition en ACV. Le concept permet de prioriser les catégories d'impact.

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

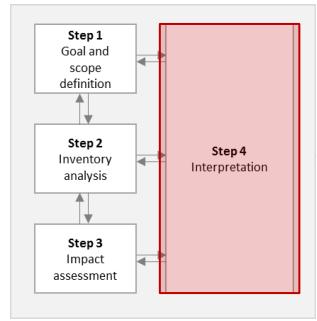
Limites

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)

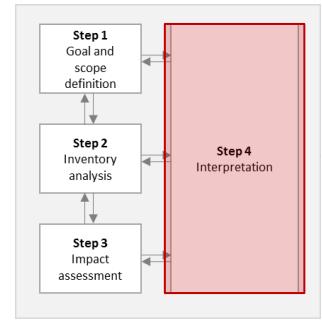
Les **incertitudes** doivent être couvertes autant que possible, notamment pour les paramètres influents (e.g. mix électriques pour les technologies électro-intensives, durée de vie d'un équipement, hypothèses d'utilisation...)

Visualisation

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

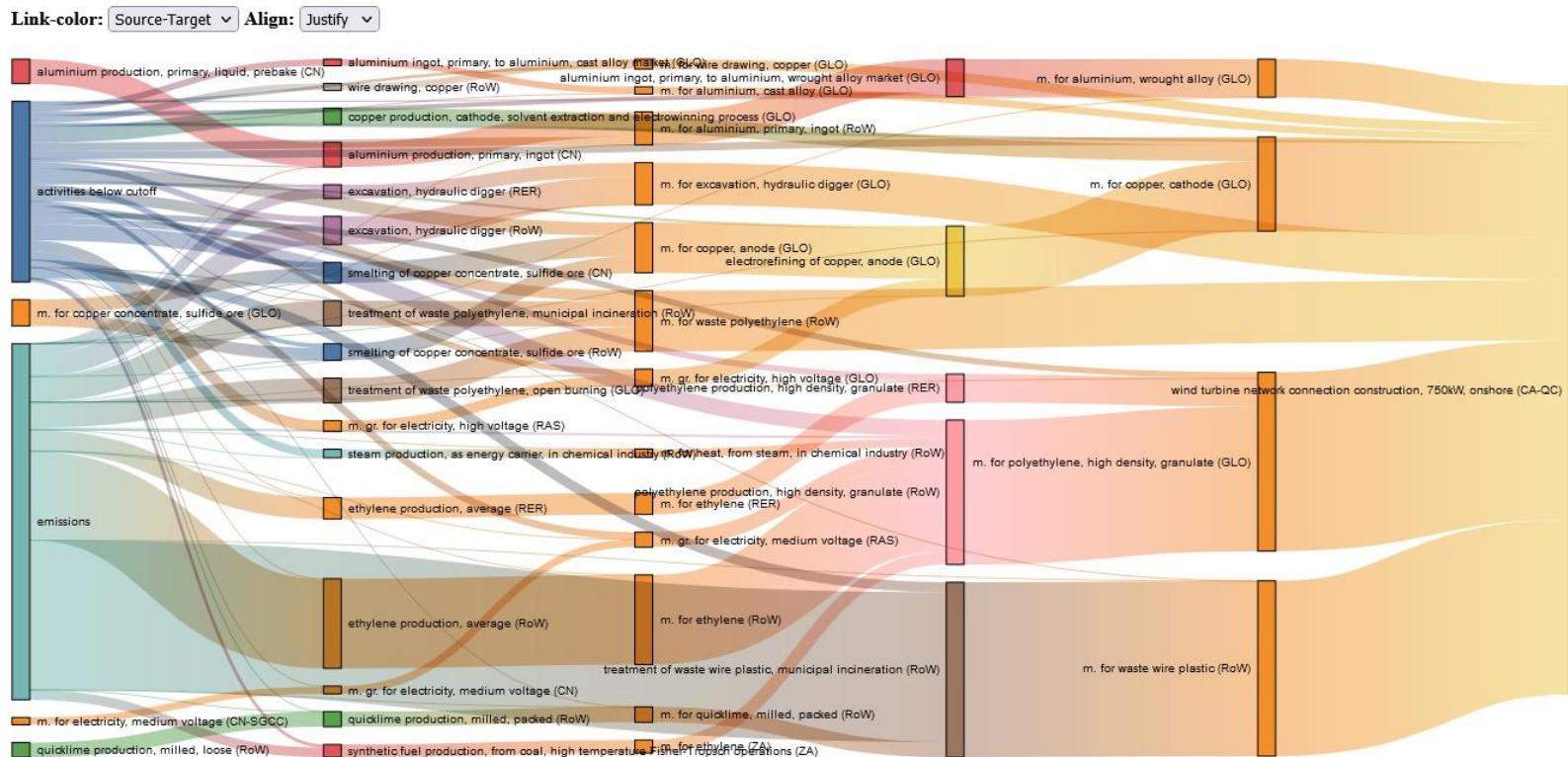


PHASE 4 : INTERPRÉTATION

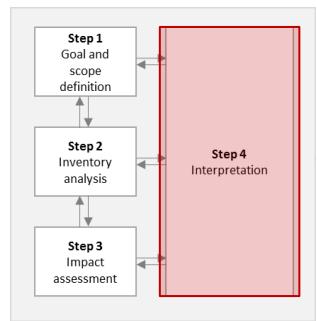


Visualisation : de quelles activités proviennent les émissions ?

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

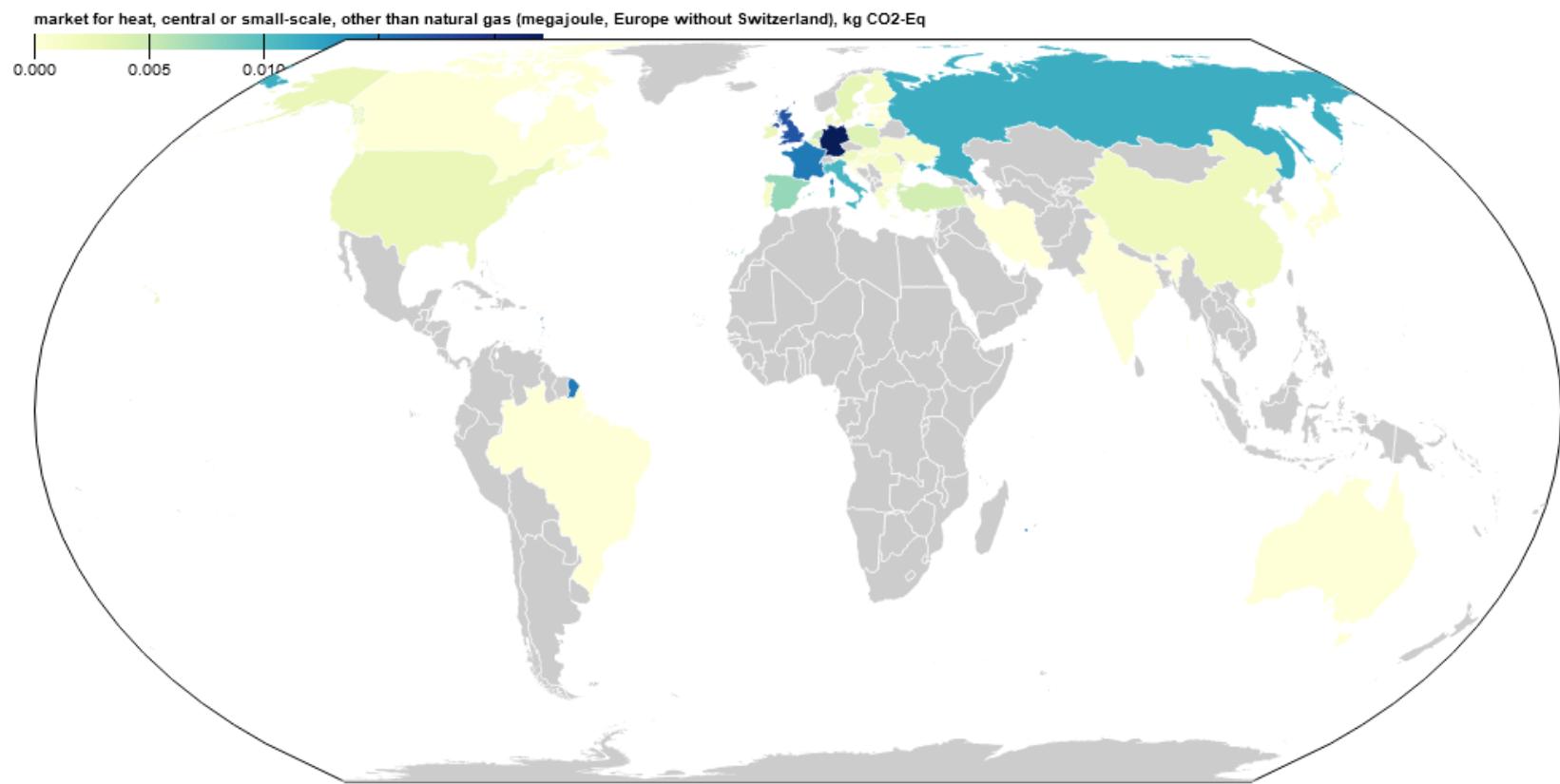


PHASE 4 : INTERPRÉTATION



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

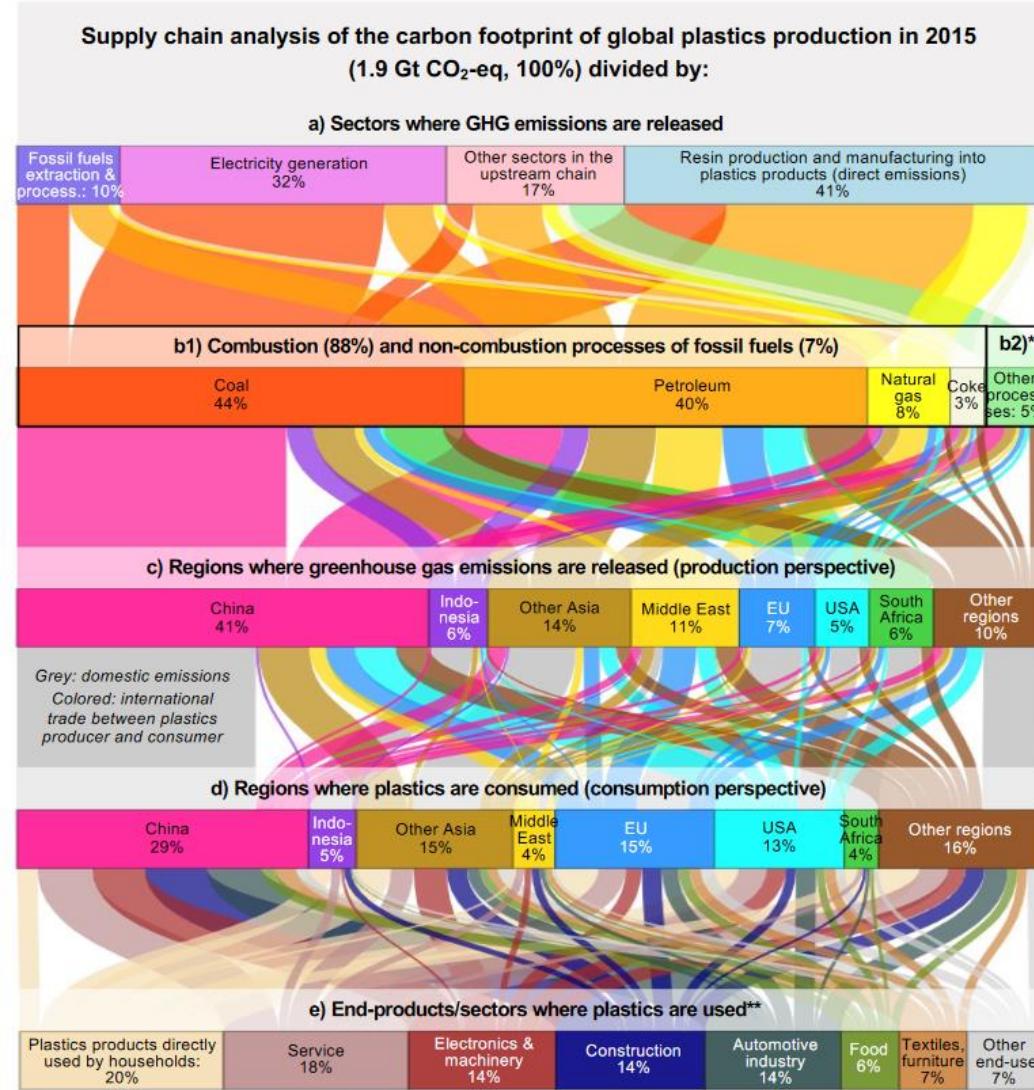
Par secteur

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).

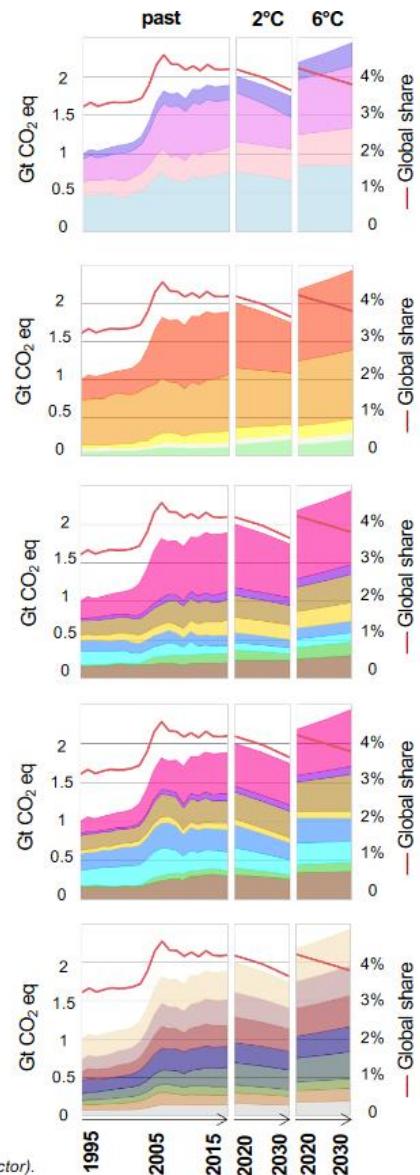


Image: Cabernard et al. 2022



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

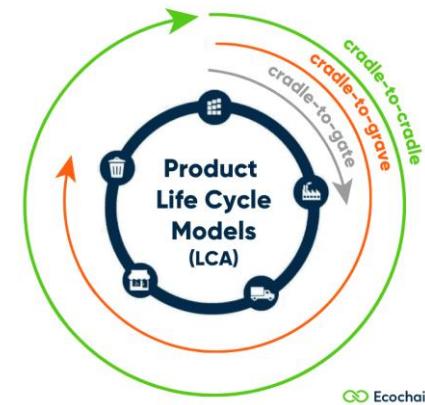


COMPARAISON D'EMBALLAGES

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

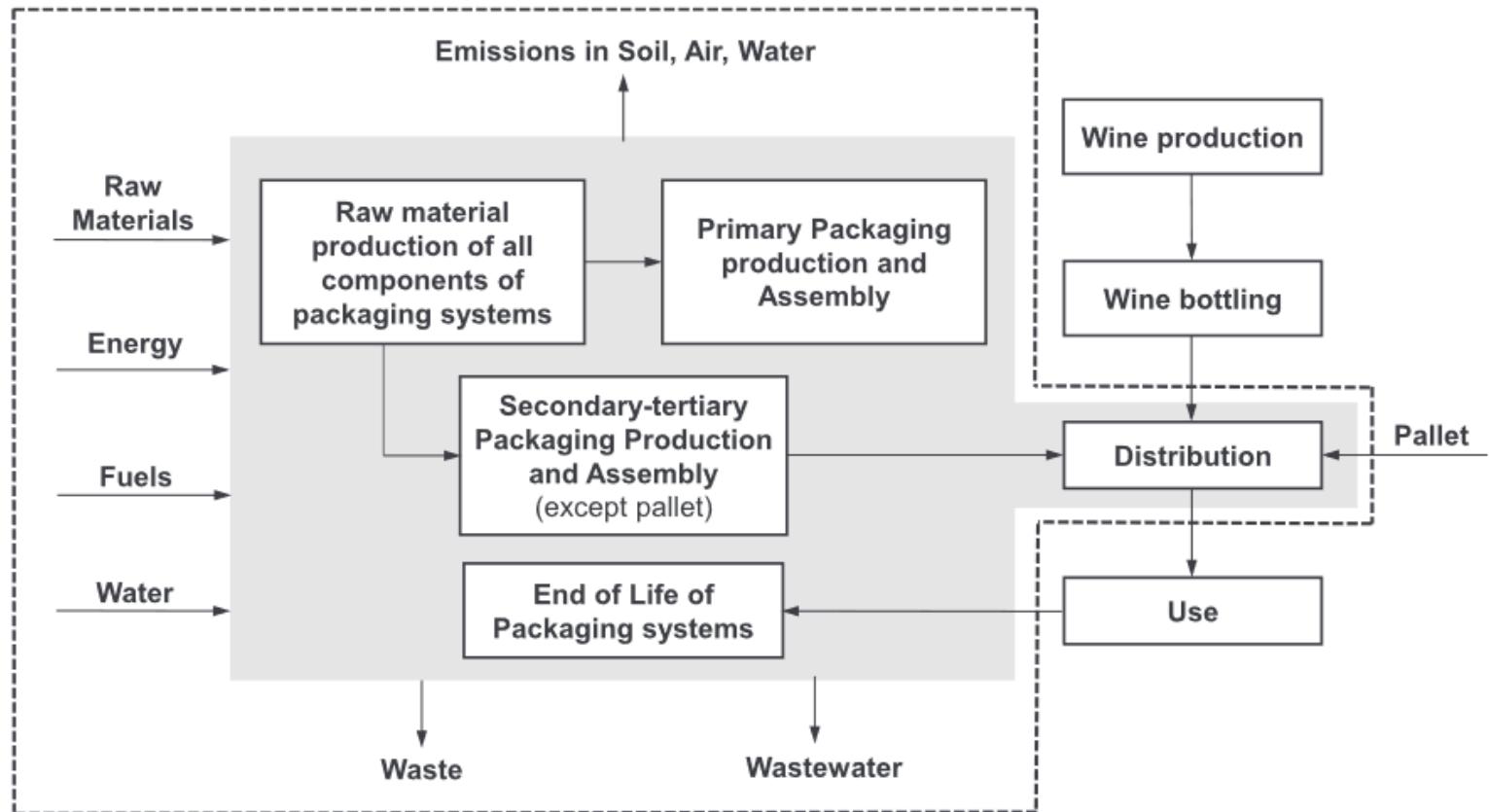
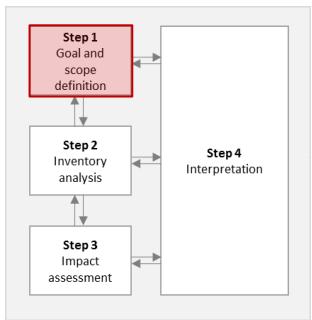


Unité fonctionnelle

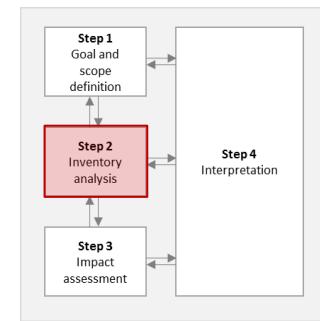
→ « emballage requis pour l'embouteillage et la distribution de 3 litres de vin »

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
Σ Primary packaging	54.9	219.8
Cardboard box	244 ^a	162.7
Cardboard sheet	830 ^b	29.1
Cardboard corner	282 ^c	7.9
PE stretch film	10.0 ^d	2.6
Σ Secondary-Tertiary packaging		202.3
Σ Packaging System		422.0

^a Weight of one cardboard box (secondary packaging) that contain 6 multilayer PET bottles.

^b Weight of one cardboard sheet (tertiary packaging needed for palletizing). Five sheets were considered for one pallet.

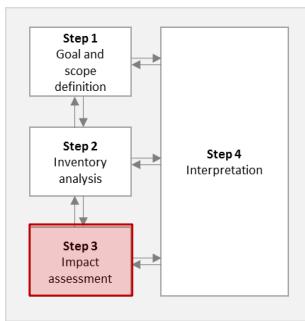
^c Weight of one cardboard corner (tertiary packaging needed for palletizing). Four corners were considered for one pallet.

^d Weight of 1 m of PE stretch film (tertiary packaging needed for palletizing).

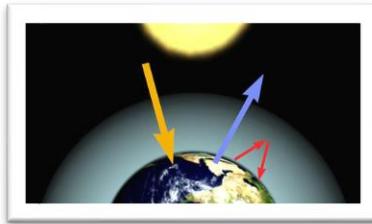


COMPARAISON D'EMBALLAGES

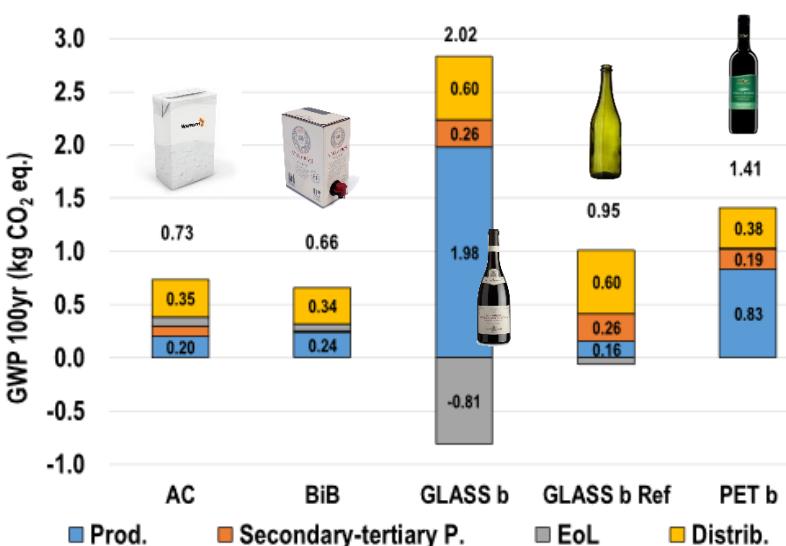
Phase 3 : évaluation d'impact



Method:
ReCiPe 2016



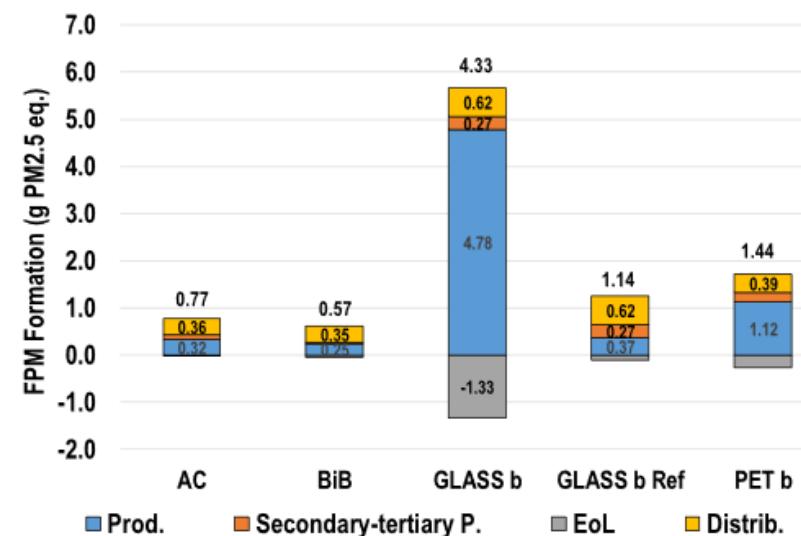
Global warming potential



(a)



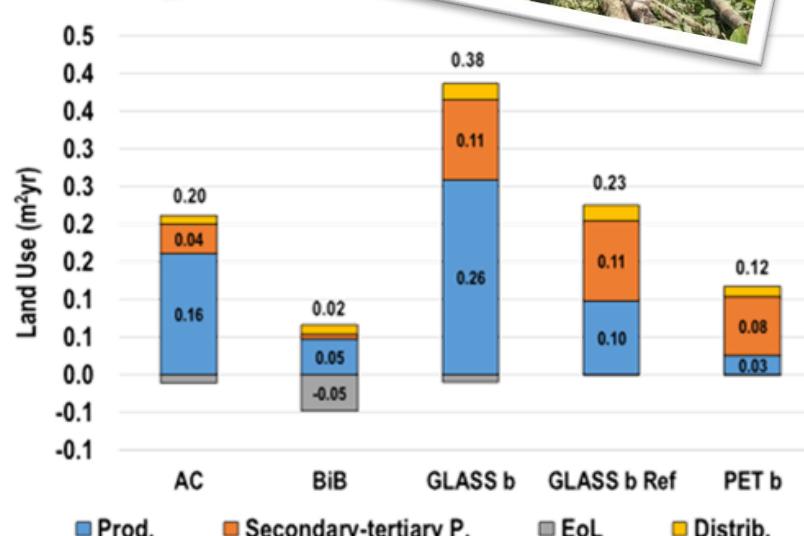
Particulate matter



(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

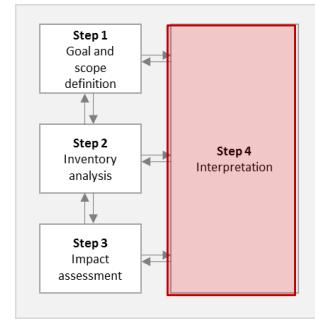
Le « bag-in-box » est l'alternative la plus respectueuse de l'environnement *pour les aspects pris en compte*

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

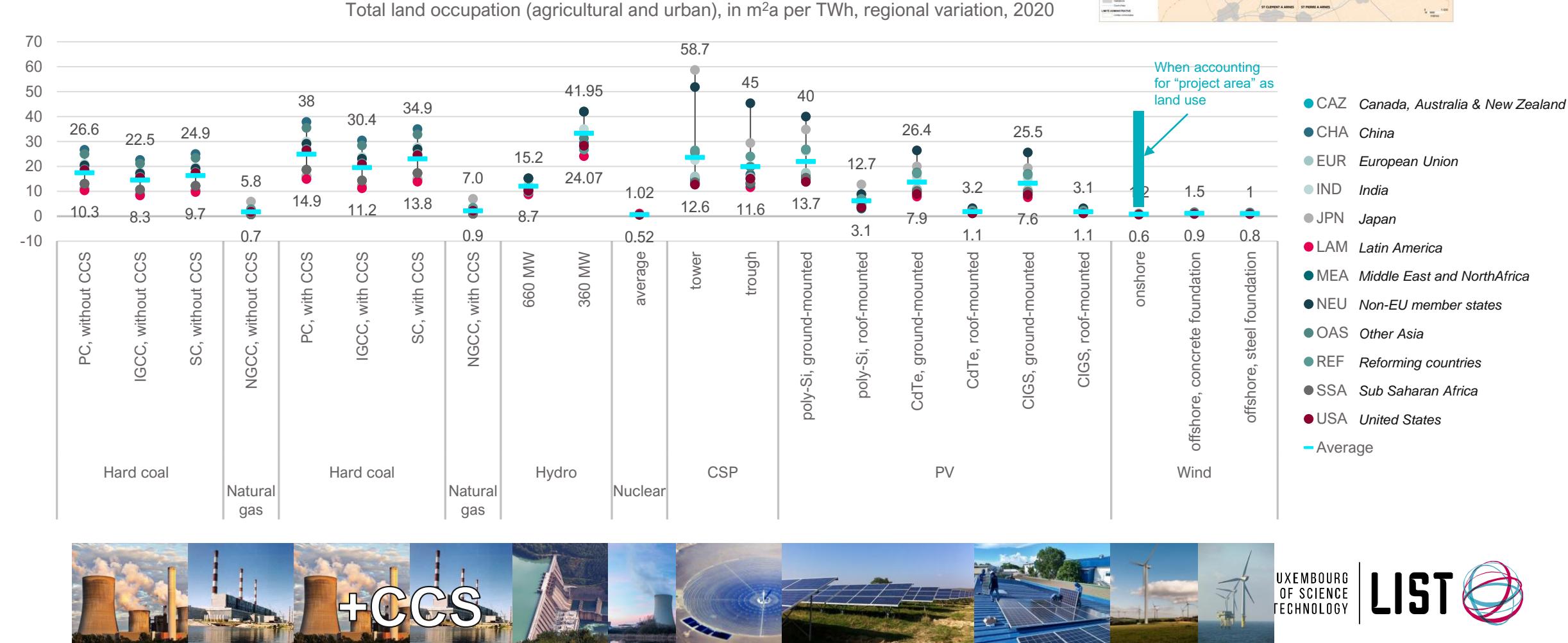
Émissions régionales de GES sur l'ensemble du cycle de vie, g CO₂ eq./kWh

Lifecycle GHG emissions, in g CO₂ eq. per kWh, regional variation, 2020



COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Cycle de vie de l'occupation du sol, en m²-annum/MWh

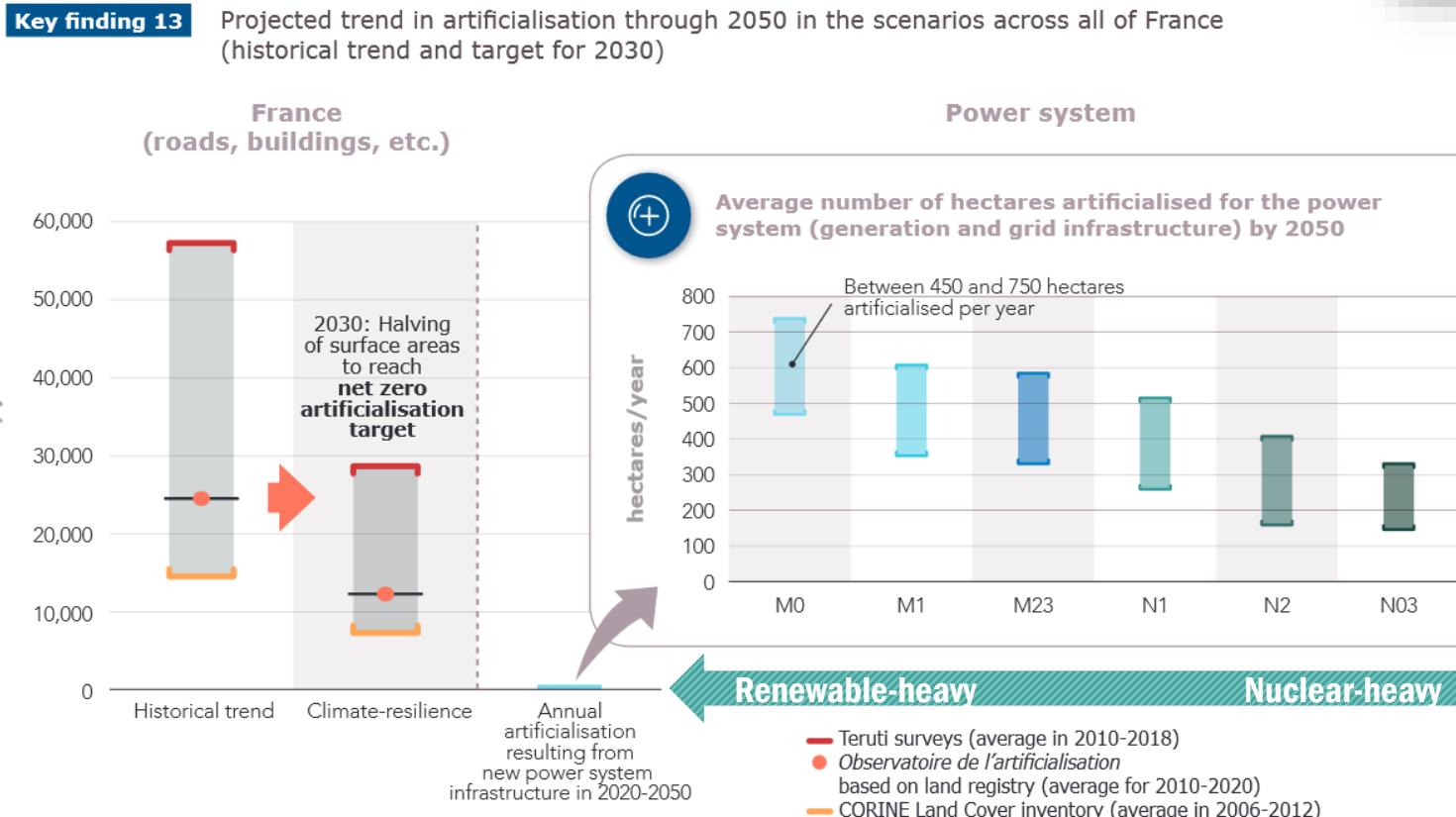
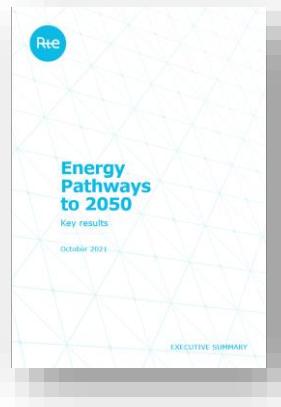


COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

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).

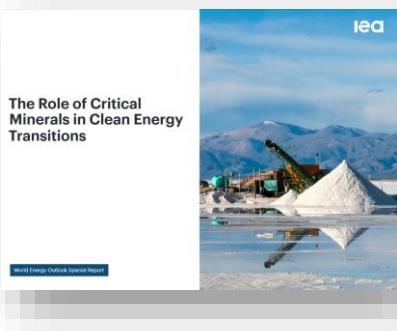
In accordance with the agreement set forth the climate and resilience act, the surface area under solar panels is counted as artificialised surface area here.



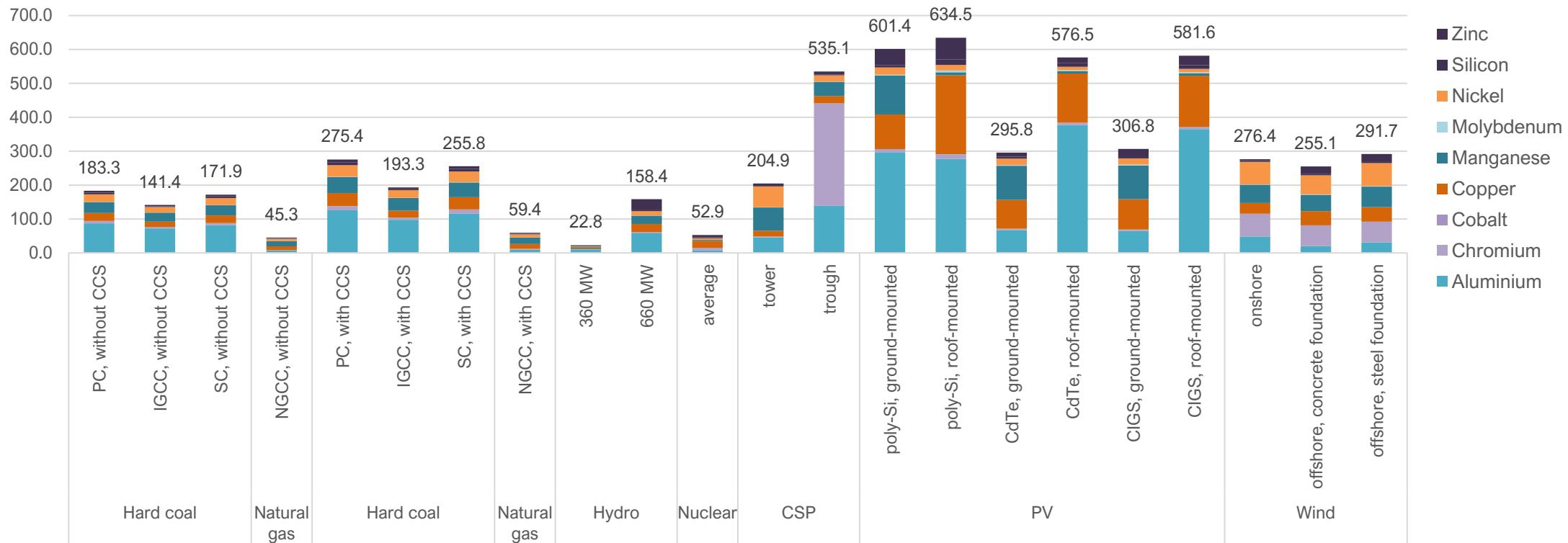
COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

⚠️ 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



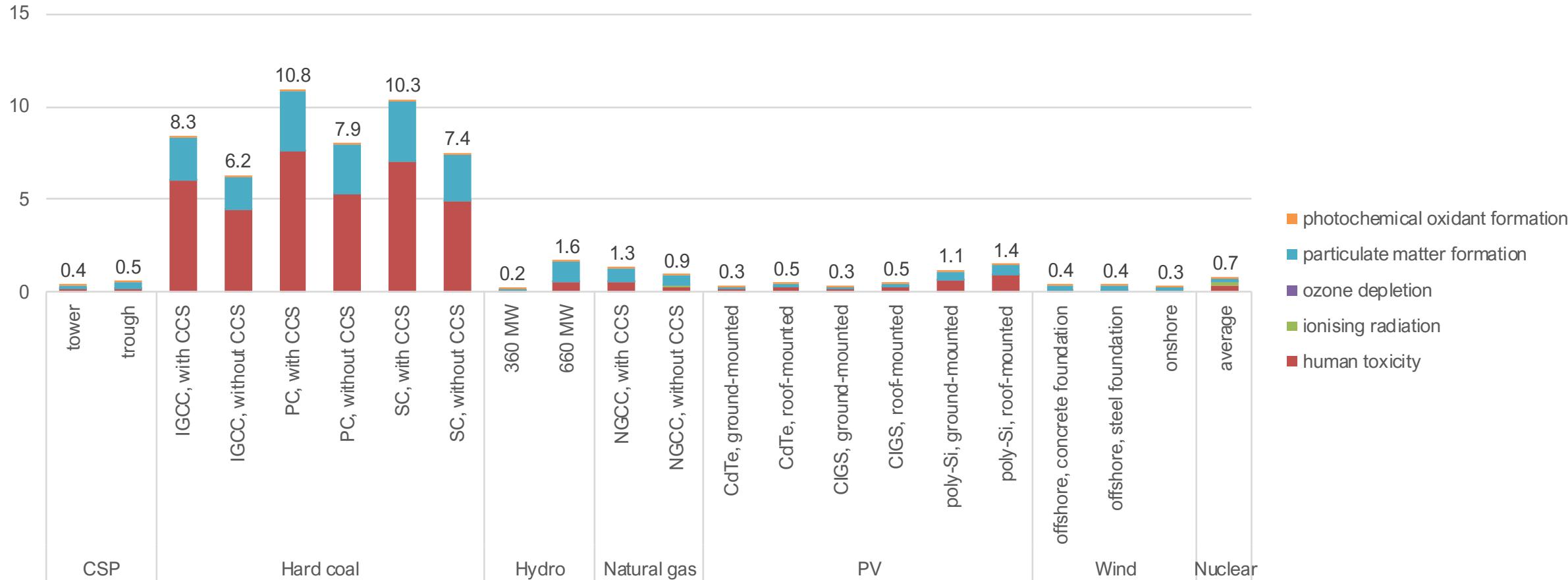
Material requirements, in g per MWh



COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Score agrégé : santé humaine

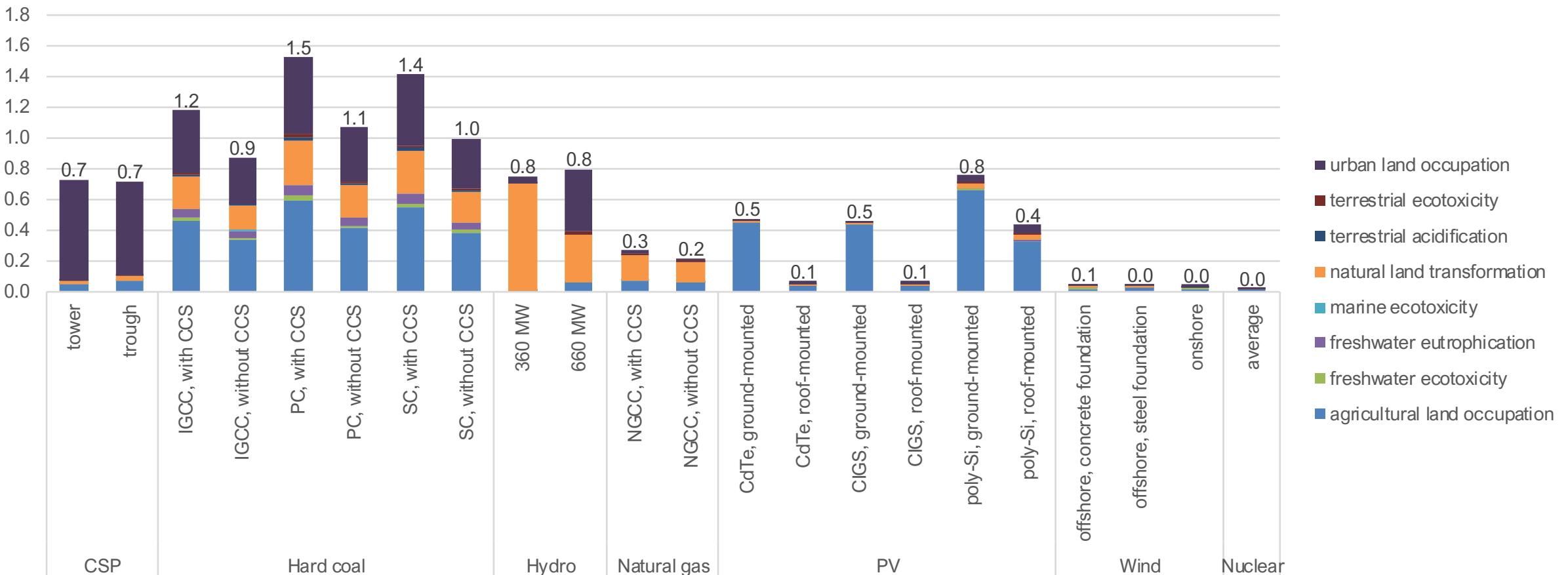
Lifecycle impacts on human health, excluding climate change, per kWh, in millipoints



COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Score agrégé : écosystèmes

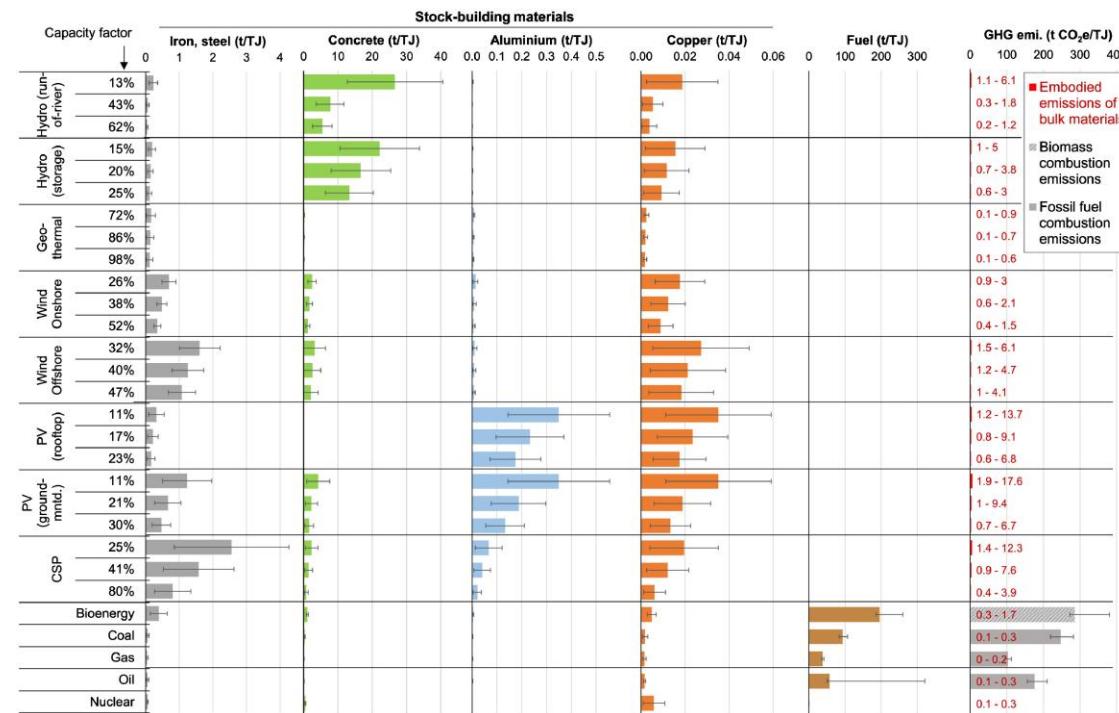
Lifecycle impacts on ecosystems, excluding climate change, per kWh, in micropoints



COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

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

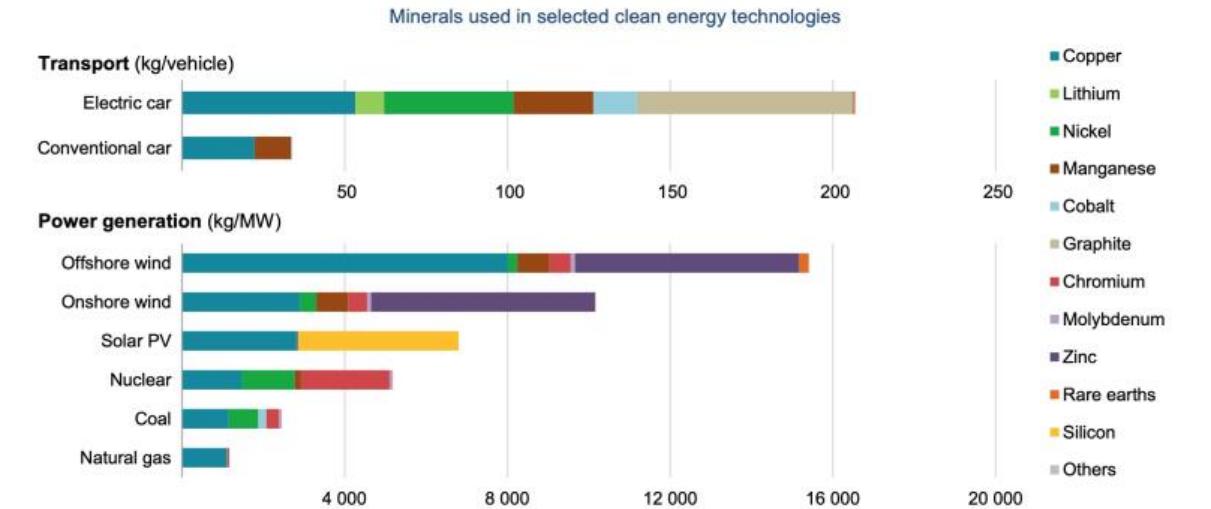
Matériaux de construction



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.



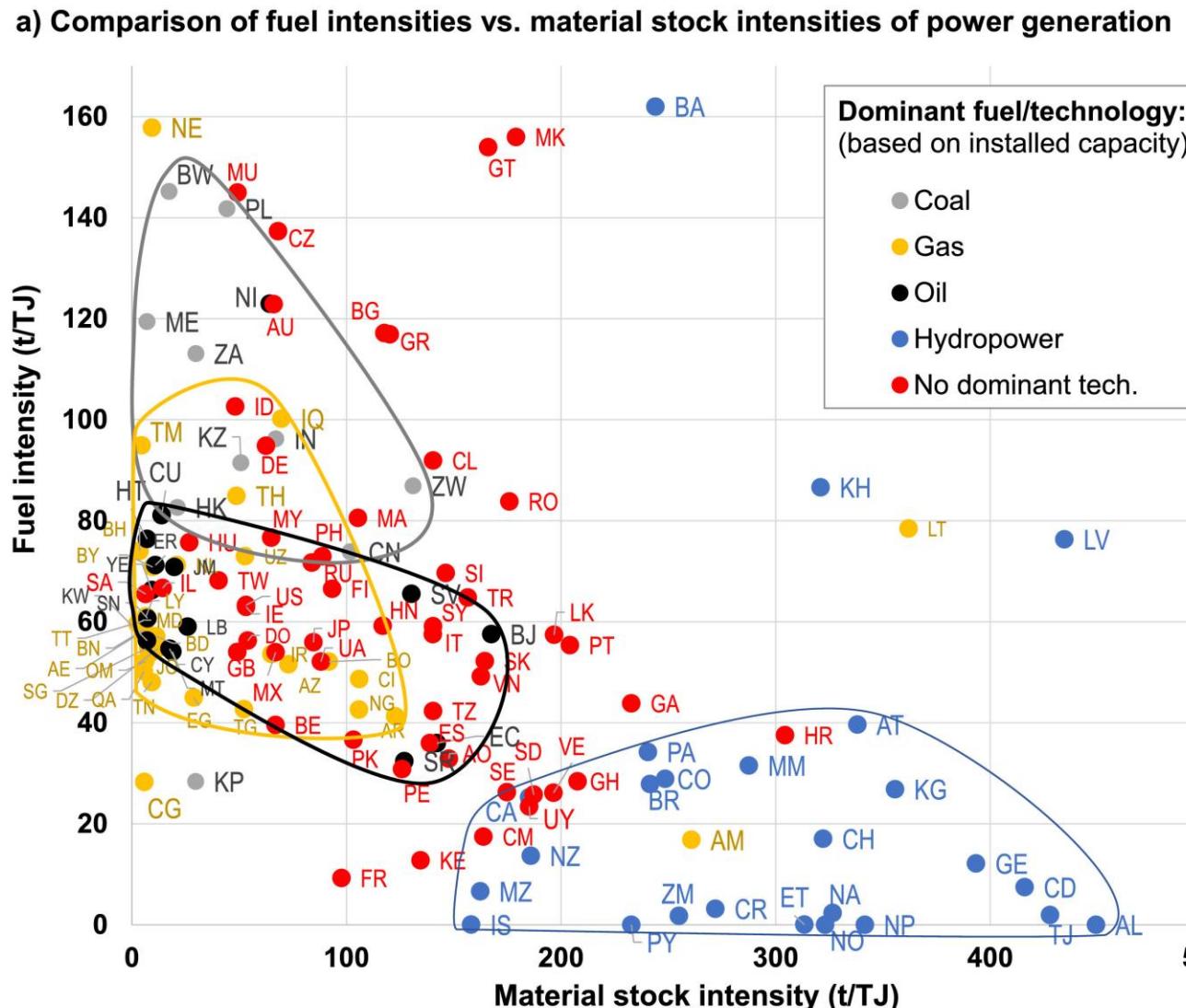
COMPARAISON DE SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

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

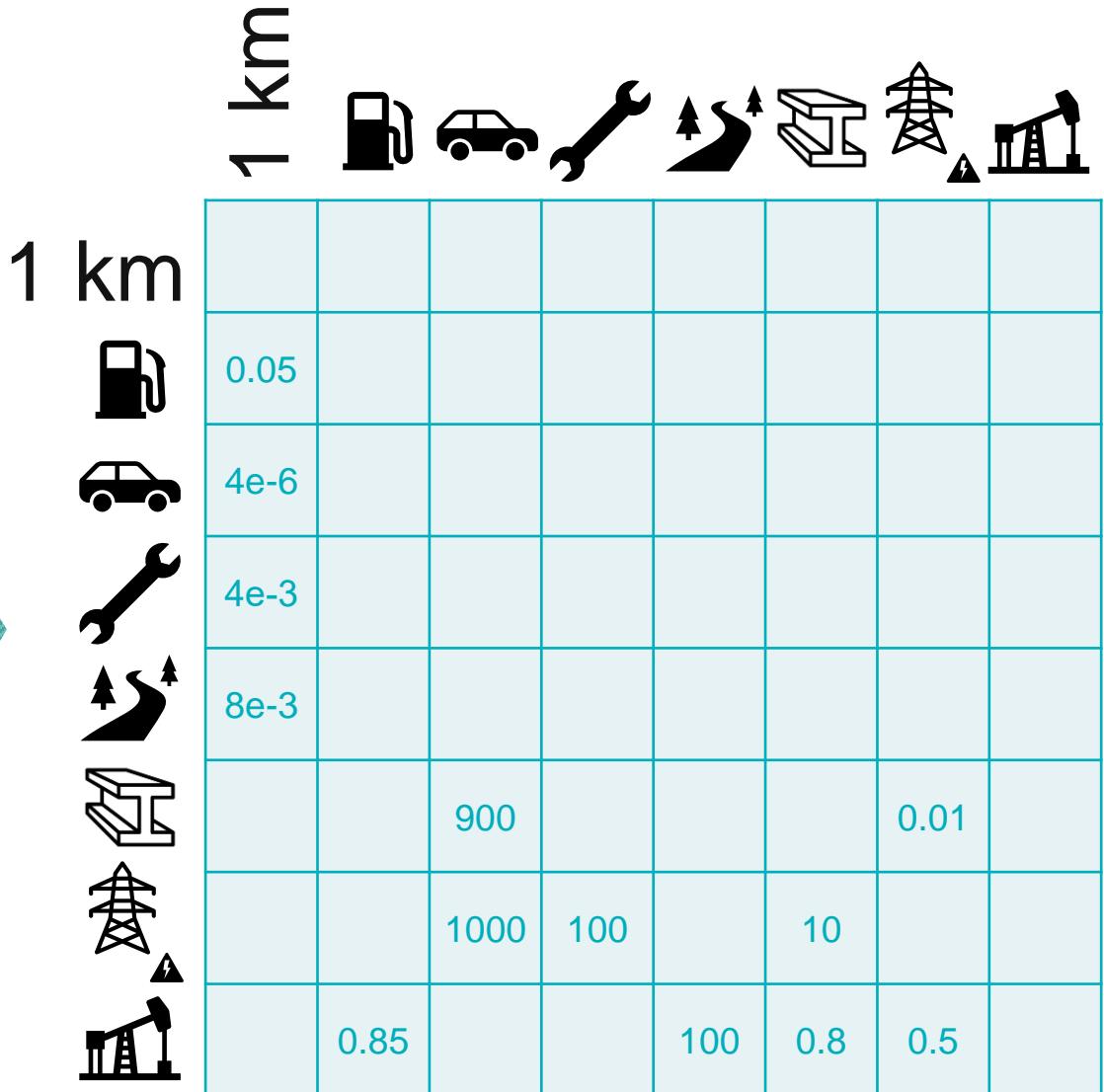
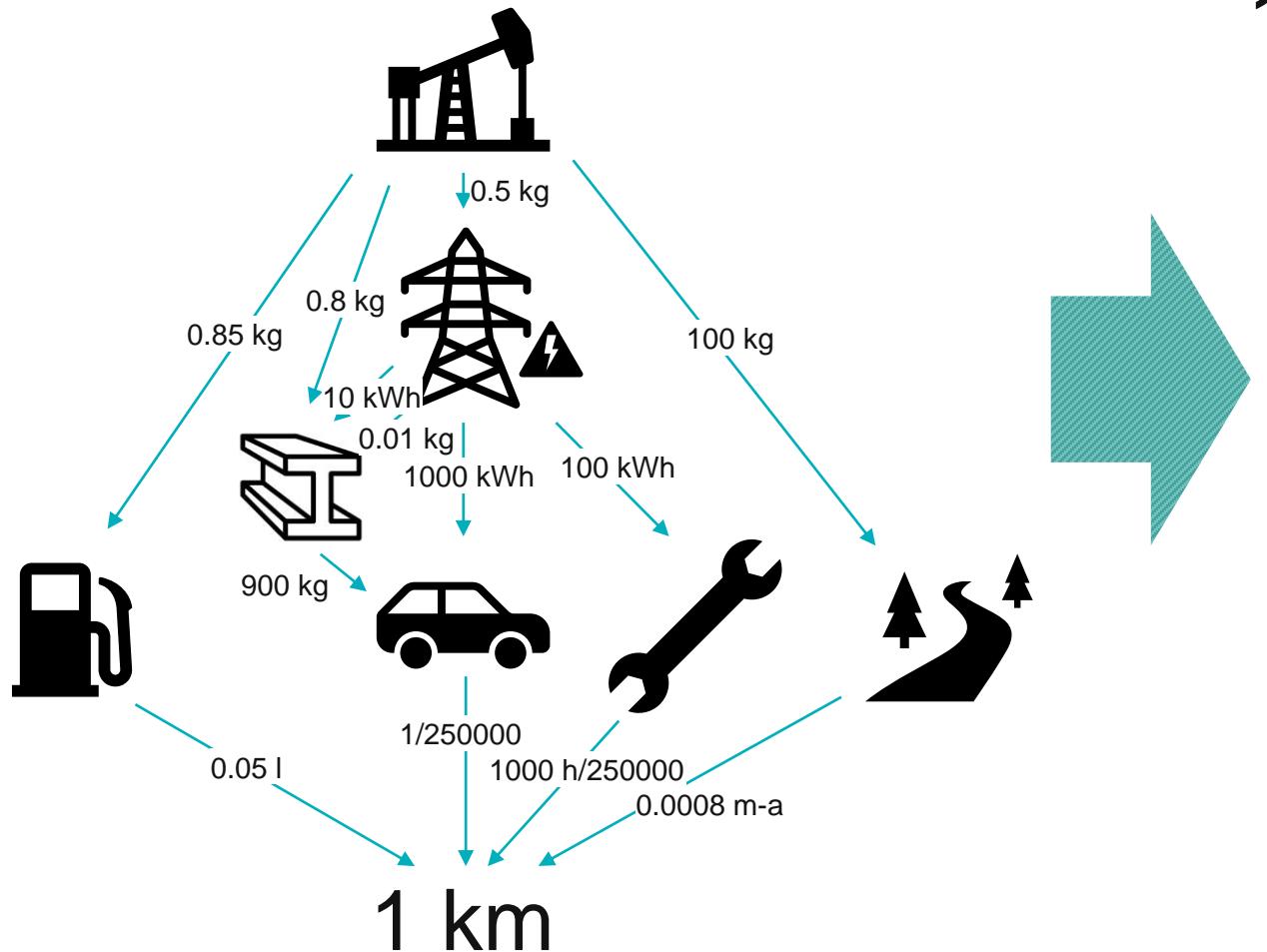
Mais cela n'est pas représentatif du « stress » ou de la « criticité » réels de l'utilisation des matériaux



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, Building, Power Line, and Oil Pump. The matrix values are as follows:

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

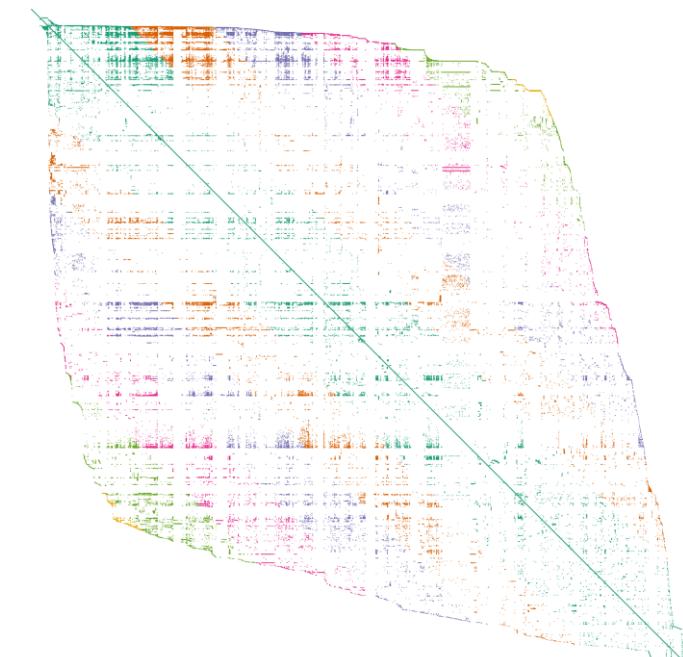
La matrice "A"

...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		10	0.01	0.8
oil pump	0.85			100	0.8	0.5

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

$$x = y + Ax$$

$$x - Ax = y$$

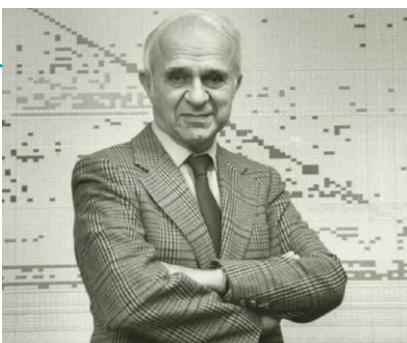
$$(I - A)x = y$$

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

$$x = Ly$$

« 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 km	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km
1.0								
0.1	1							
4.0E-06		1						
4.0E-03			1					
8.0E-03				1				
8.5E-03		1011	1		1	1	1.1E-02	
0.5	11111	111			11	1		
1.1	1	6364	56	100	6	1	1	

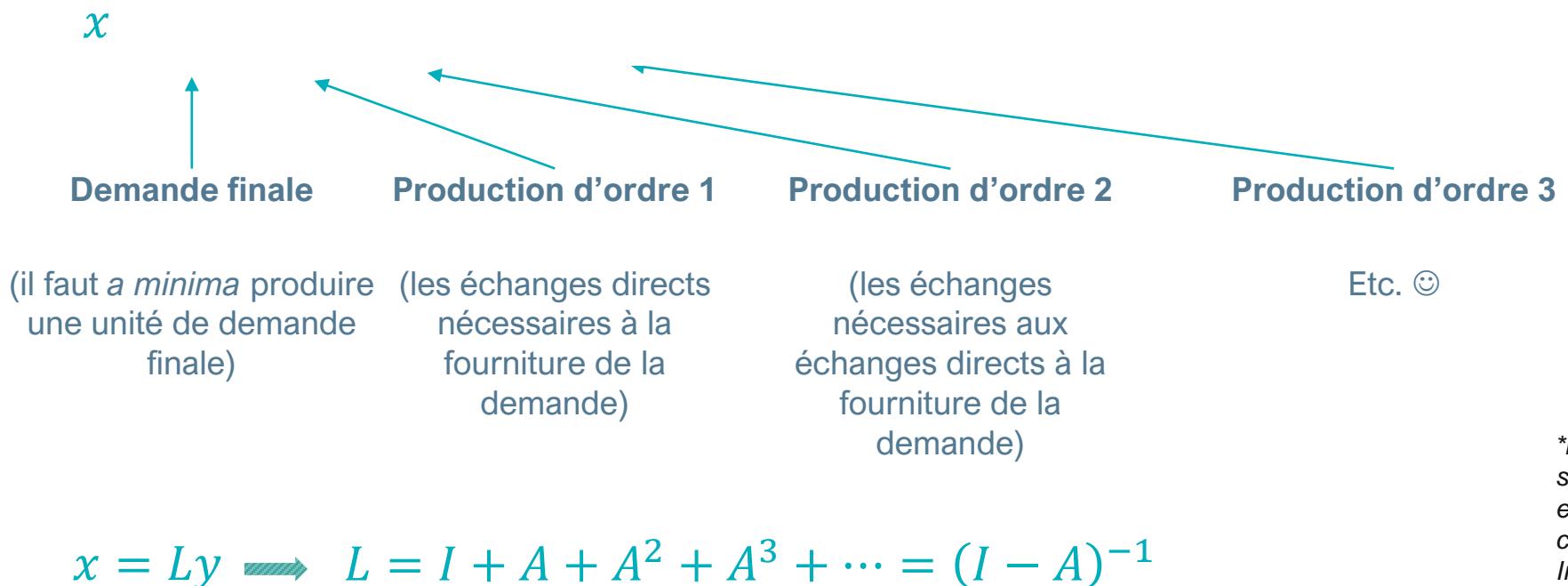
La matrice “L”

...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

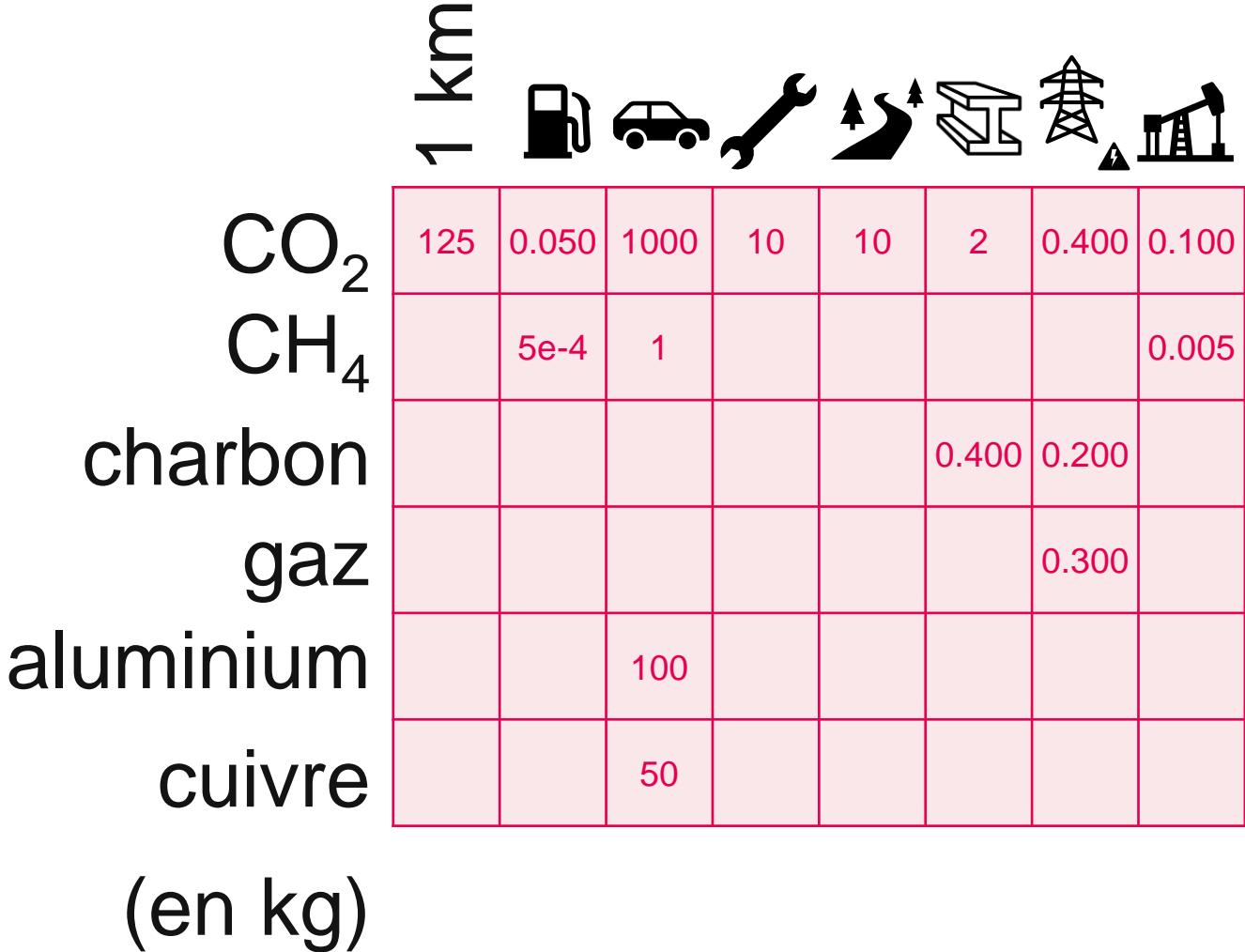
Par définition, L contient les coefficients d'échange entre activités, en couvrant les échanges directs et l'ensemble de la chaîne de valeur amont, ce qui peut se réinterpréter



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

UN PEU D'ALGÈBRE

Dernière étape (ou presque)

GES
Énergie primaire
Matériaux

	CO ₂	CH ₄	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 : $e = B(I - A)^{-1}y$

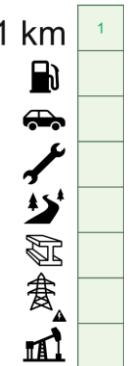
Résultats d'évaluation d'impact : $d = Ce = CB(I - A)^{-1}y$

GES		
Énergie primaire		
Matériaux		

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

1 km								
CO ₂	125	0.050	1000	10	10	2	0.400	0.100
CH ₄		5e-4	1					0.005
charbon						0.400	0.200	
gaz							0.300	
aluminium				100				
cuivre			50					

1 km							
1.0							
0.1	1						
4.0E-06							
4.0E-03							
8.0E-03							
8.5E-03							
0.5							
1.1	1	6364	56	100	6	1	1



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 ?

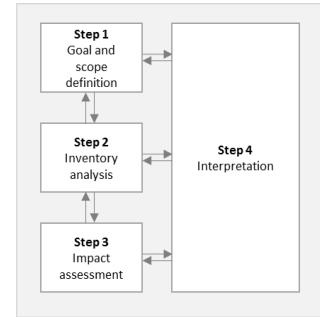
Comment délimiter notre système ?

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 CO₂ 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

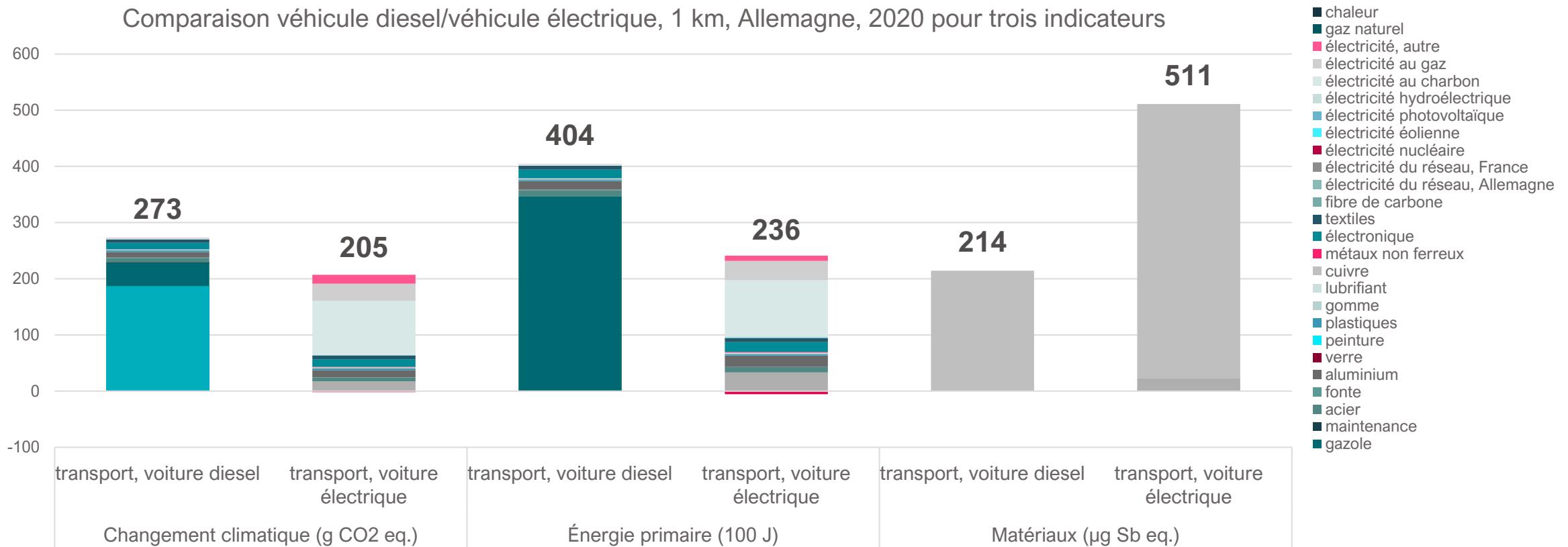


substance	unité	km transport, voiture diesel	km transport, voiture électrique
GES	kg CO2 eq.	0.273	0.201
Énergie primaire	MJ	4.041	2.358
Matériaux	kg Sb eq.	2.1E-07	5.1E-07



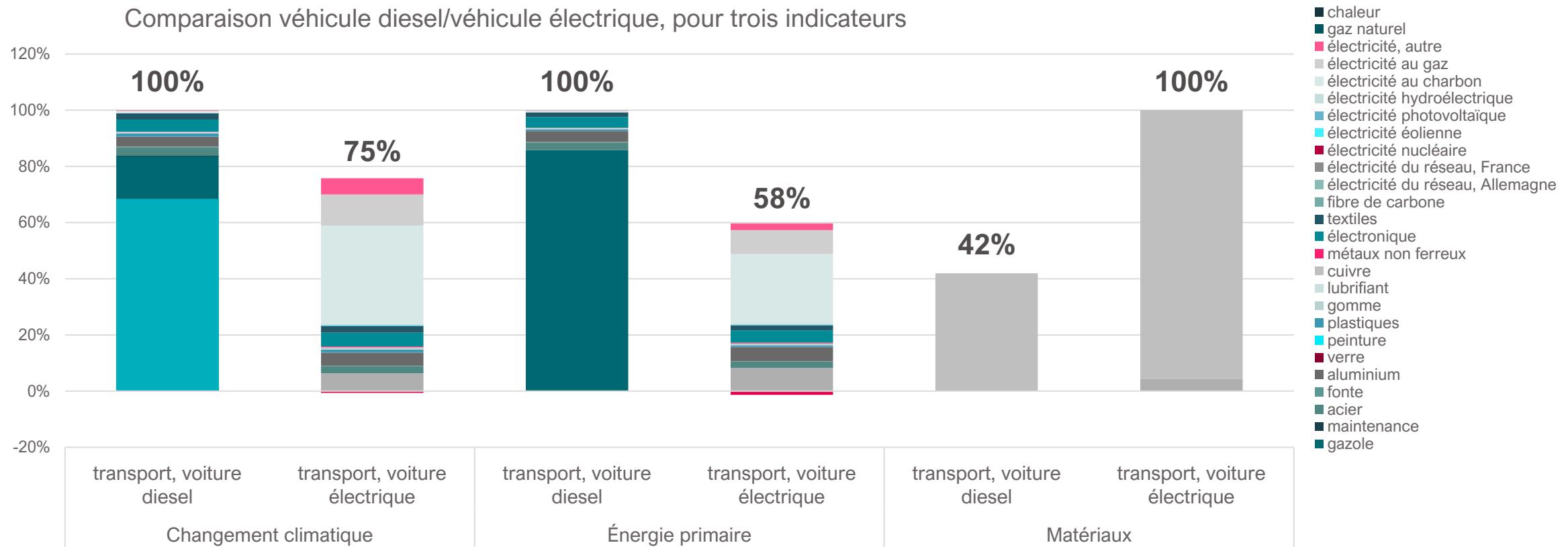
ÉTUDE DE CAS

Phase 4 : interprétation – résultats absolu



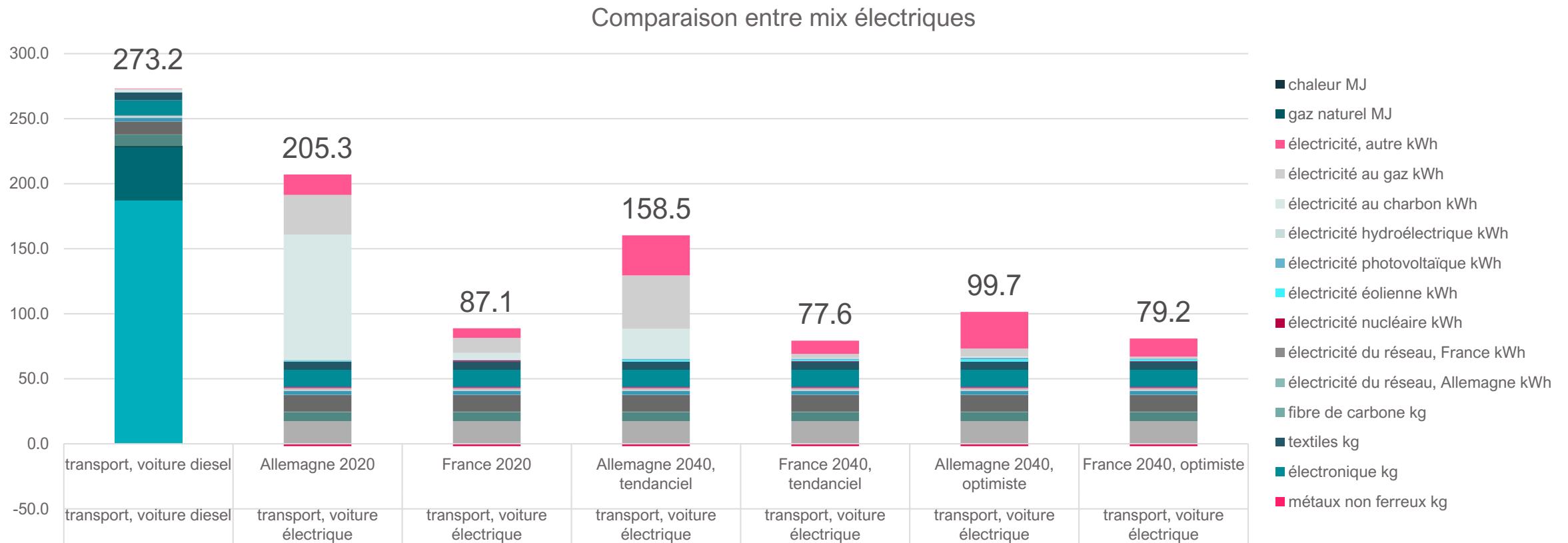
ÉTUDE DE CAS

Phase 4 : interprétation – résultats relatifs



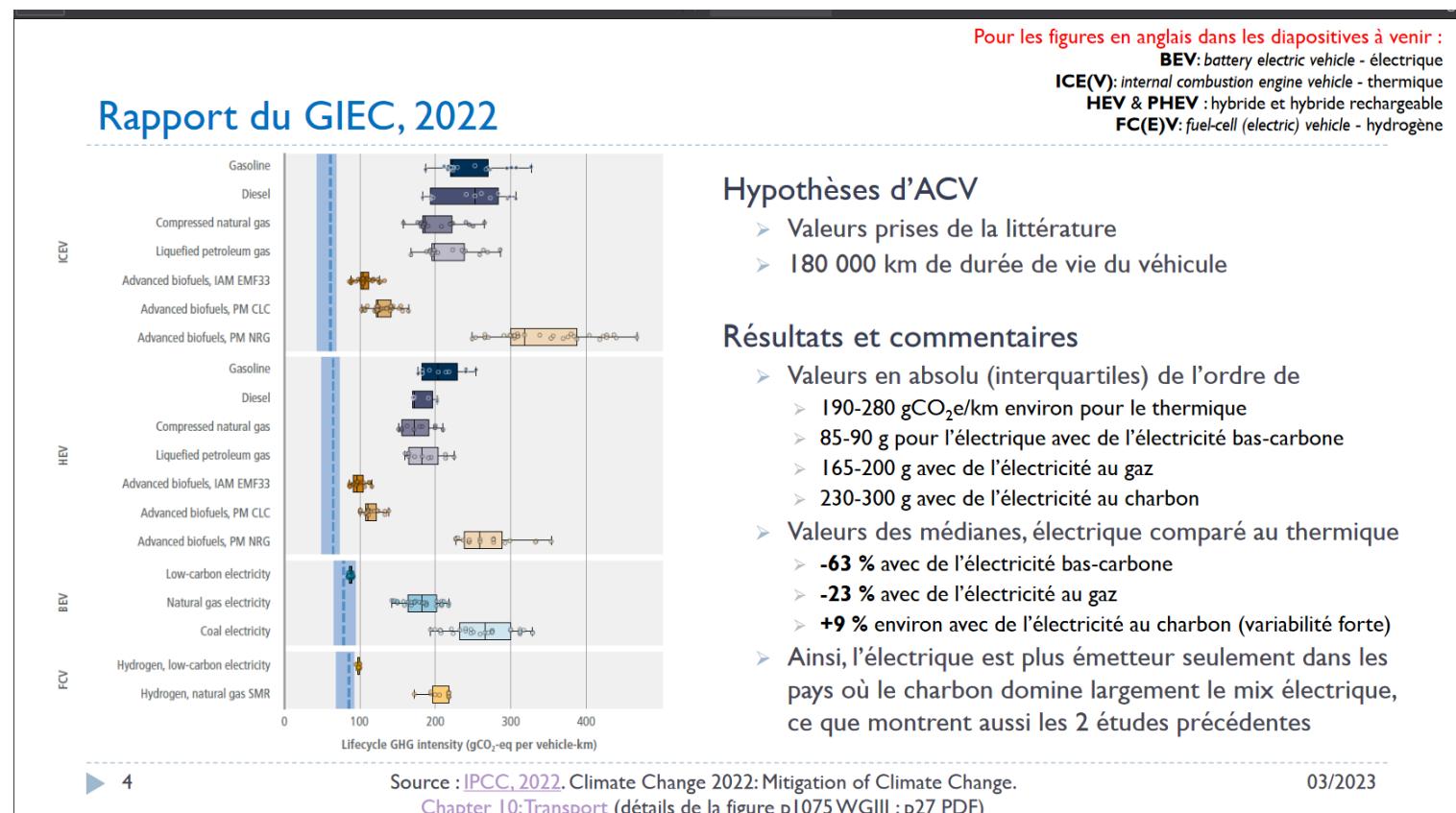
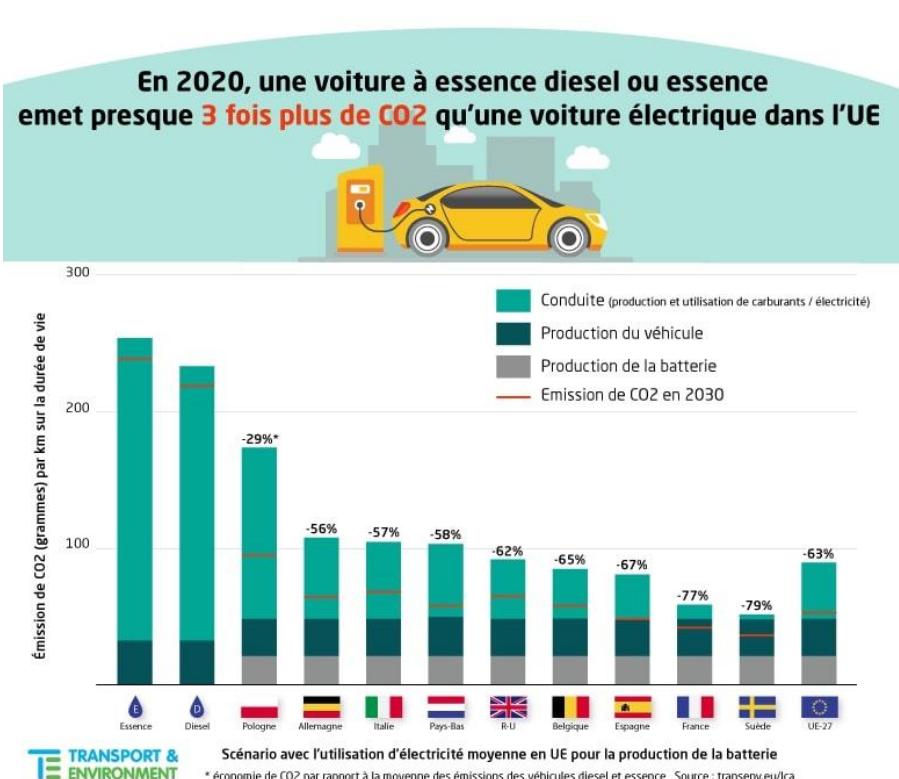
ÉTUDE DE CAS

Phase 4 : interprétation – sensibilité mix électrique



ÉTUDE DE CAS

Phase 4 : interprétation – comparaison avec la littérature



ÉTUDE DE CAS

Phase 4 : interprétation

Quelles analyses pouvons-nous proposer ?

Comment l'impact évolue en fonction du kilométrage

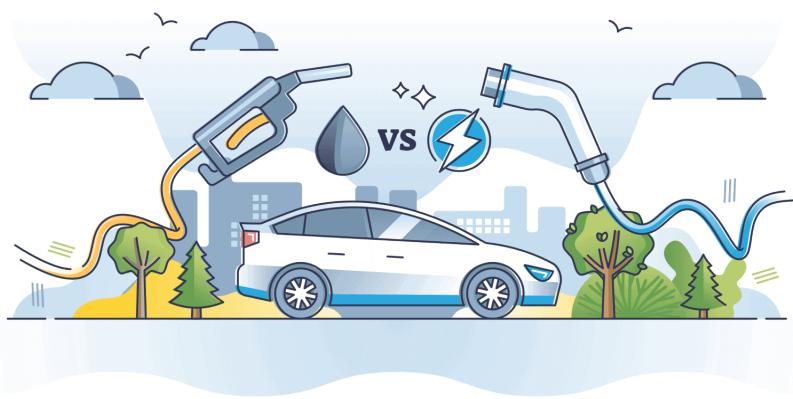
Comment l'impact évolue en fonction du poids du véhicule

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 ?



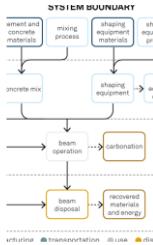
04 | CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

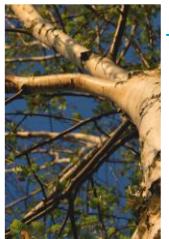
Messages-clés



L'ACV est une méthode normalisée (ISO 14040)



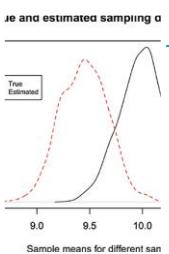
L'ACV est une méthode holistique et multicritère



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