

ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Tiffany DESBOIS

16/11/2022

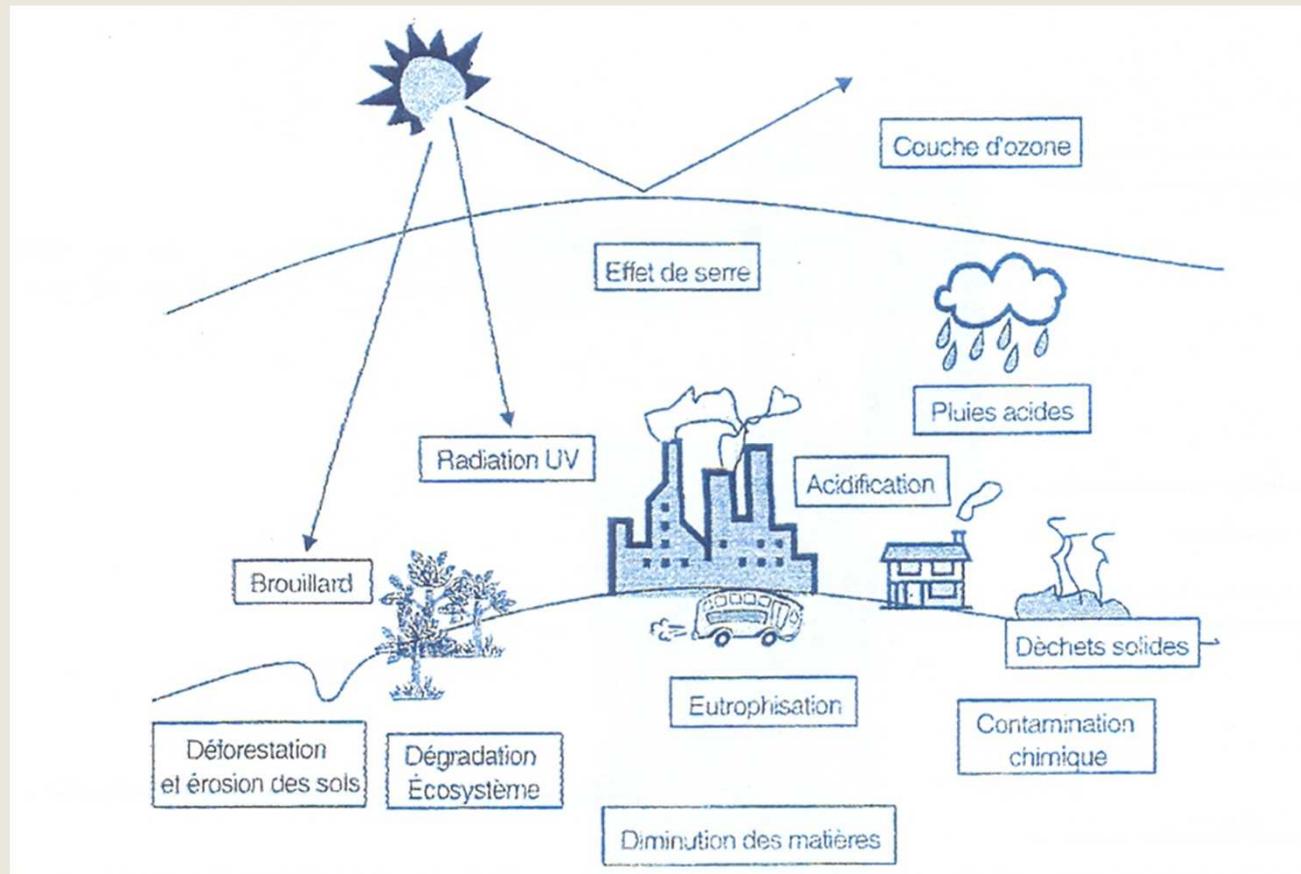
école
normale
supérieure
paris-saclay

université
PARIS-SACLAY

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX



Des enjeux multiples et liés



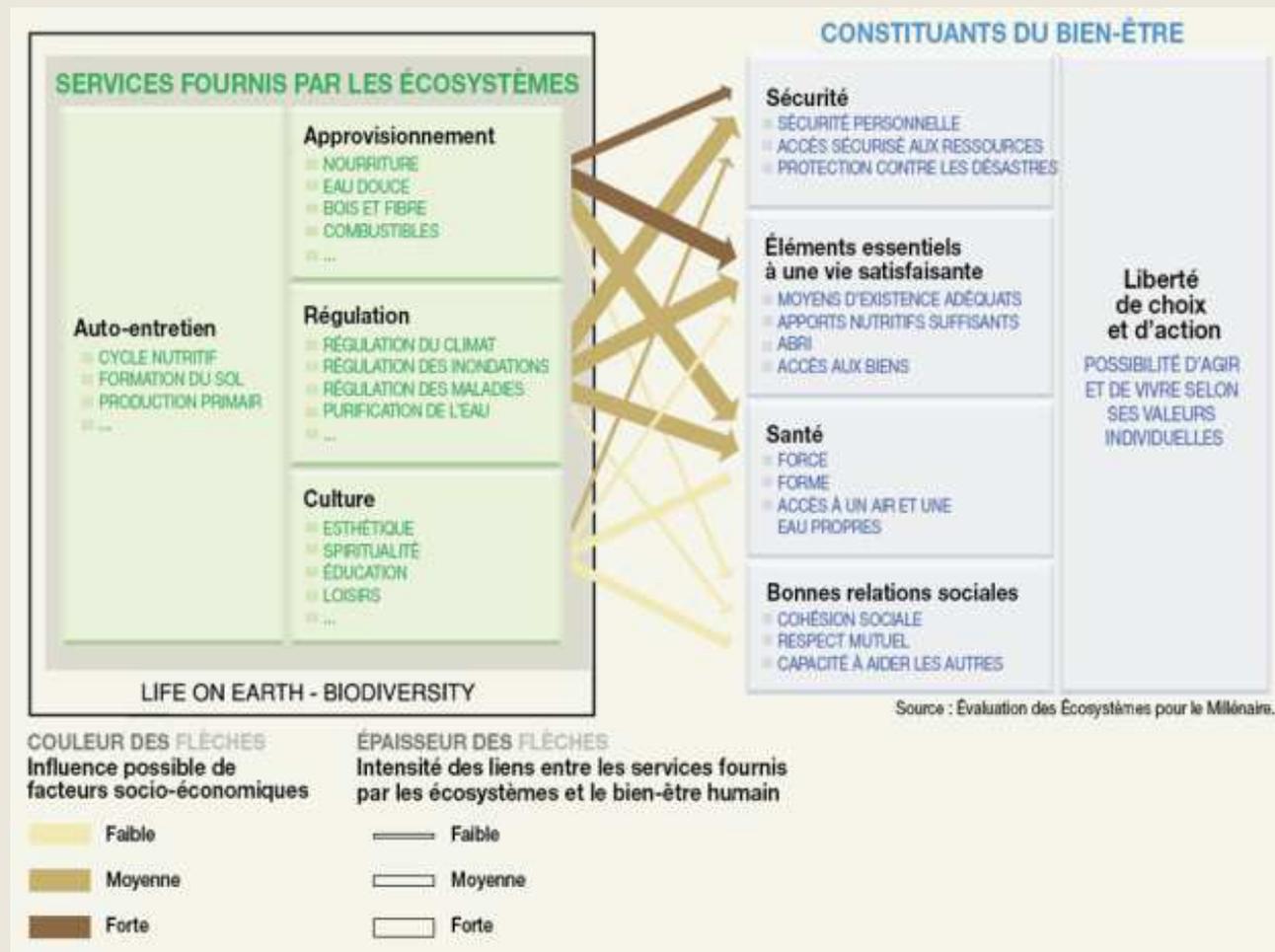
Source : Cours « Analyse de Cycle de Vie », ENS, 2021, Adélaïde Feraille

Notion de « Services écosystémiques »

- Biens et services fournis par les écosystèmes à l'humanité et qui sont nécessaires à son bien-être et à son développement
- La survie de l'humanité dépend de la pérennité des services écosystémiques
- Valeur estimée à 125 mille milliards d'USD en 2014 (source : ONU)

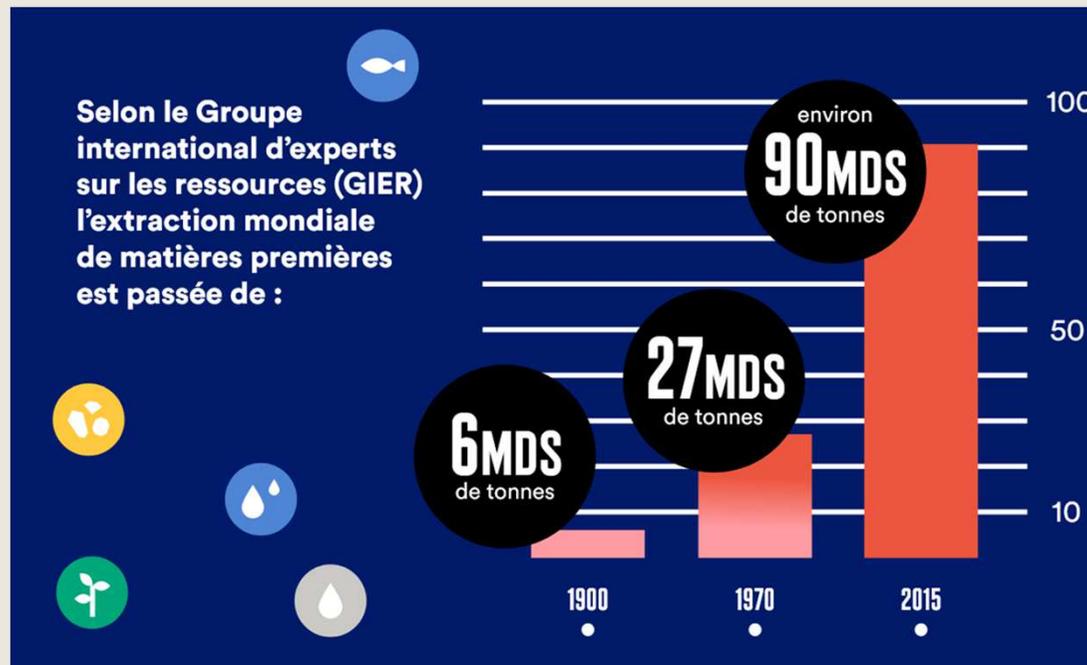


Services écosystémiques et bien-être



Constat

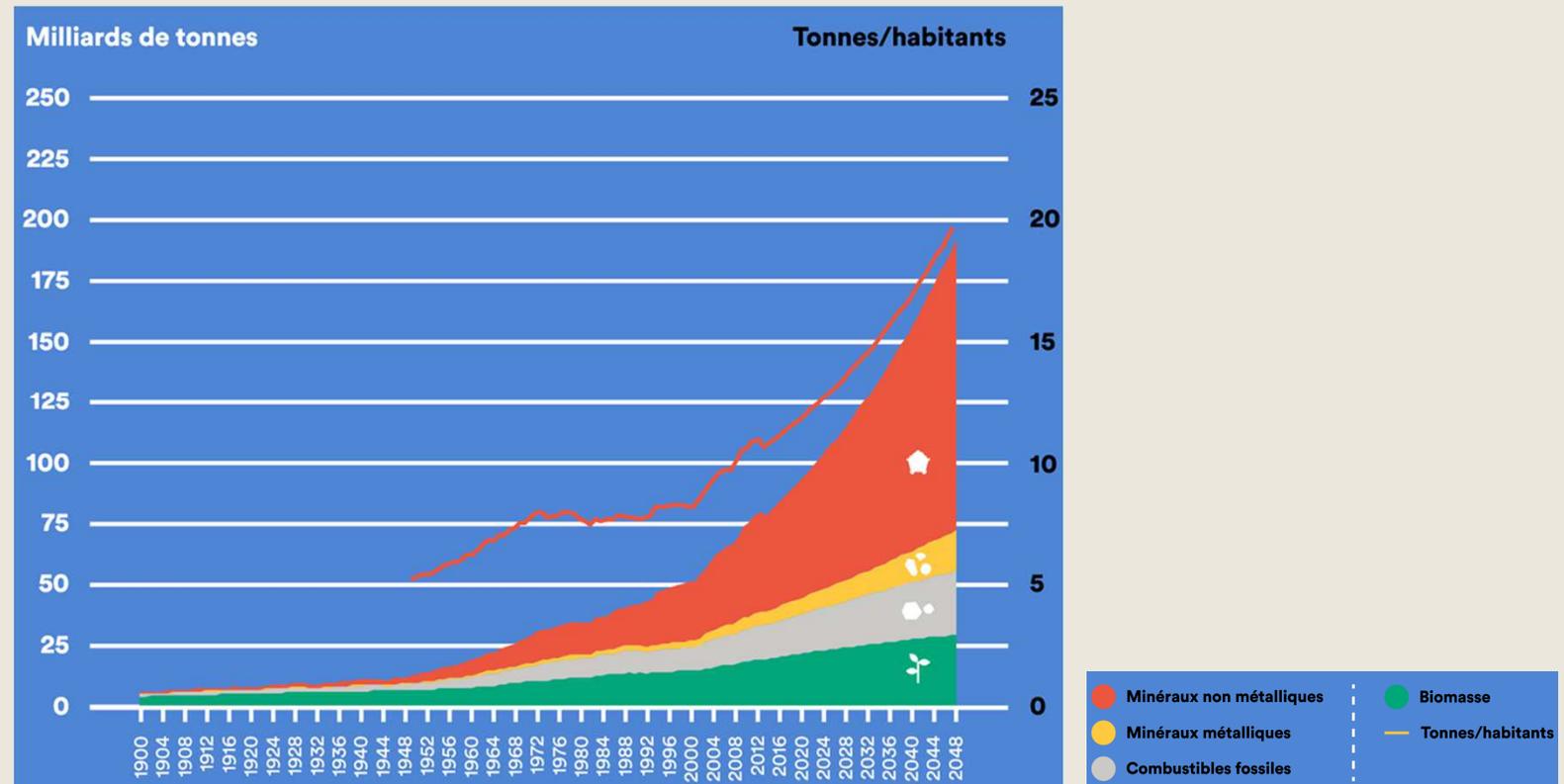
Extraction de matières premières



Source : Infographie ADEME

Constat

Extraction mondiale de matières premières depuis 1900 et projections 2015-2050 à croissance constante



Source : Infographie ADEME

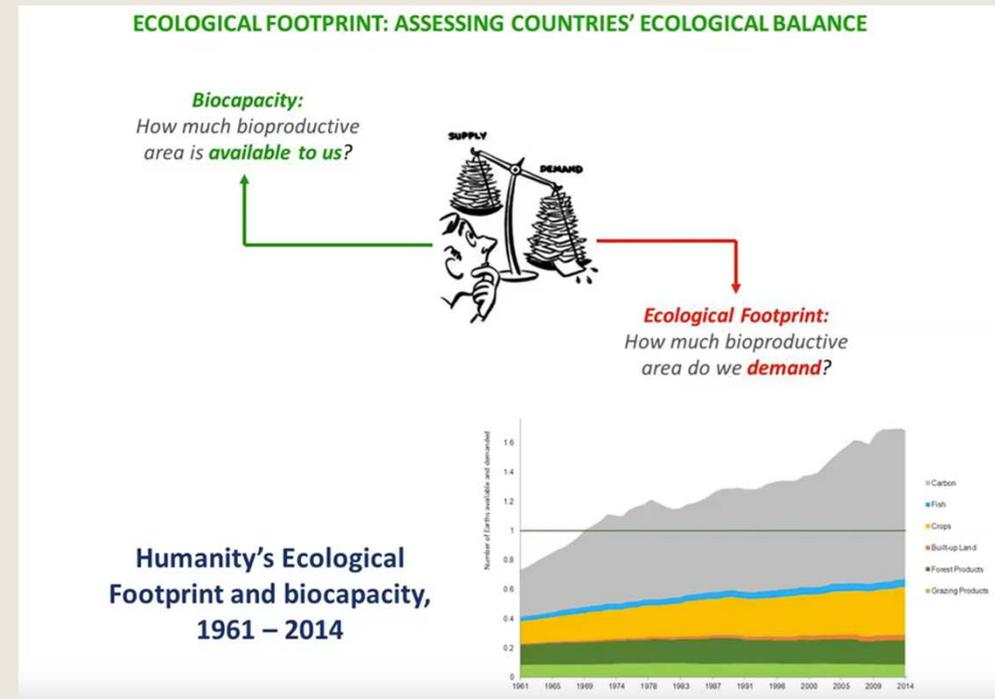
Constat

Global Overshoot Day



Notions de « biocapacité » et « d'empreinte écologique »

- **Biocapacité** : La capacité des écosystèmes à fournir des matières biologiques utiles et à assimiler des déchets générés par les hommes en utilisant les modes de gestion et les technologies d'extraction existantes.
- **Empreinte écologique** : la surface biologiquement productive de terre et d'eau dont un individu, une population humaine ou une activité a besoin pour produire les ressources qu'elle consomme et absorber les déchets qu'elle génère en utilisant les technologies et les pratiques de gestion des ressources existantes.



Source : EUSTEPS

Empreinte écologique

ECOLOGICAL FOOTPRINT components



Forest
Products

Carbon Footprint

Cropland

Pasture

Built-up Land

Fisheries

CARBON
CO₂ emissions associated with use of fossil fuels, electricity and energy intensive commodities, converted into biologically productive areas (such as forest land) necessary for their sequestration.

GRAZING LAND
The area of grasslands used to raise livestock for meat, dairy, hide and wool products. It includes all grasslands used to provide feed for animals, including cultivated pastures, wild grasslands and prairies.

FOREST
The area of forests required to support the annual harvest of fuel wood, pulp and timber products.

FISHING GROUNDS
The area of marine and inland waters required to support annual catches of aquatic species (fish and seafood).

CROPLAND
The area required to grow all crop products required for human consumption (food and fiber) and for livestock foods, fish meals, oil crops and rubber.

BUILT-UP LAND
The area of land covered by human infrastructure such as transportation, housing, industrial structures and reservoirs for hydroelectric power generation.

Biocapacité vs Empreinte écologique



Biocapacity



Ecological Footprint

Source : EUSTEPs

Constat

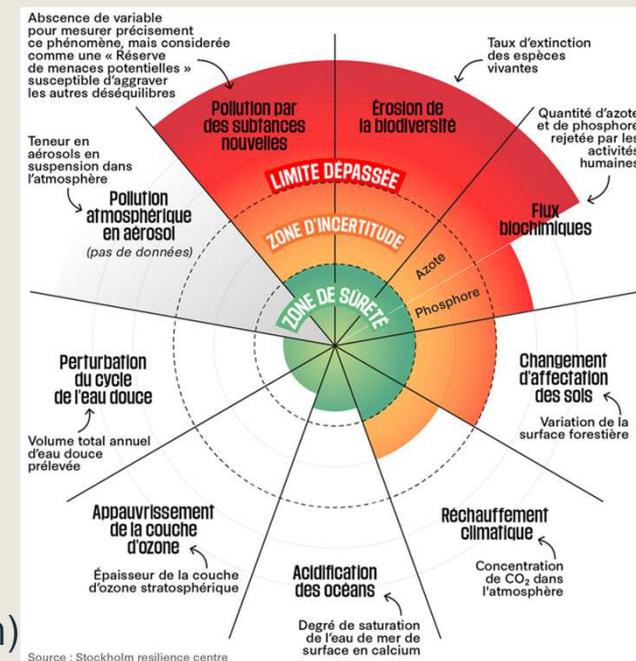


Notion de « Limites planétaires »

- Limites planétaires : Seuils définis pour un certain nombre de processus et systèmes régulant la stabilité et la résilience du système terrestre.
- Il est nécessaire d'être en dessous des seuils afin que l'humanité puisse se développer dans un écosystème « sûr ».
- Pour aller plus loin, Dominique Bourg, Professeur à la Faculté des géosciences et de l'environnement de l'Université de Lausanne :

<https://www.youtube.com/watch?v=pCTjQ6JOD-A> (15 min)

<https://www.youtube.com/watch?v=X28JwYwfl0c> (10 min)



Source : « On joue avec le feu »

www.liberation.fr/environnement

par Éléonore Disdero,
publié le 23 janvier 2022

De l'holocène à l'anthropocène

- Compte tenu de l'ampleur croissante des pressions anthropiques sur l'environnement naturel (Steffen et al., 2011) :
 - *Fin de l'Holocène : époque géologique relative à la stabilité des conditions d'habitabilité sur Terre au cours des 10 000 dernières années*
 - *Début de l'Anthropocène*
- Paul Crutzen en 2000 souligne en utilisant le terme « Anthropocène » que « l'empreinte humaine sur l'environnement planétaire est devenue si vaste et intense qu'elle rivalise avec certaines des grandes forces de la Nature en termes d'impact sur le système Terre » (Bonneuil et Fressoz, 2016).

Histoire du développement durable

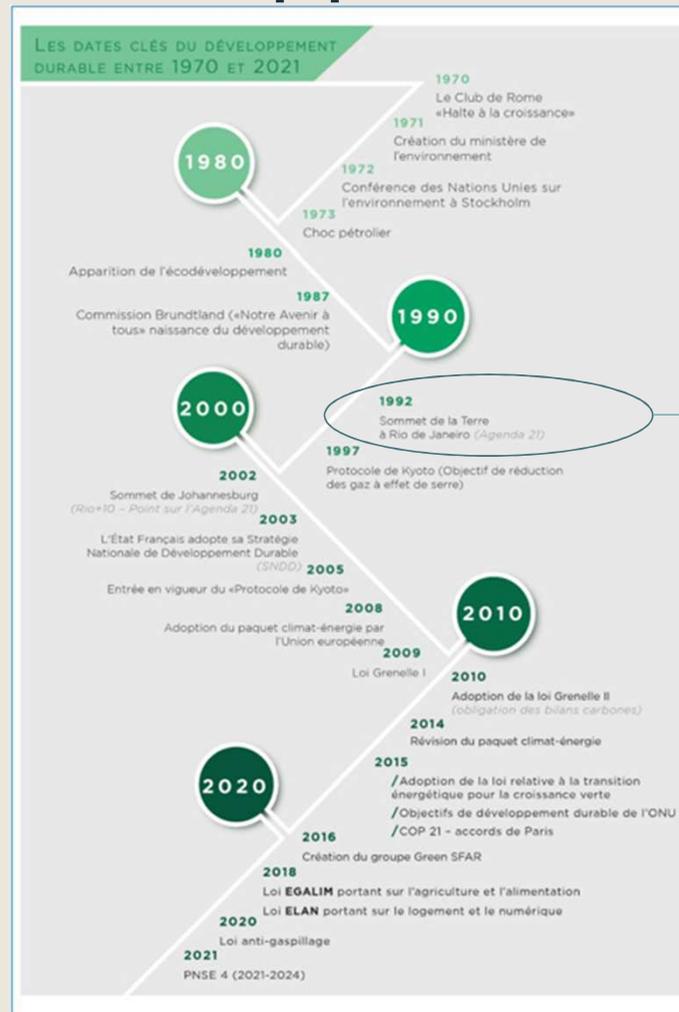
1986 : catastrophe de nucléaire de Tchernobyl

1996 : crise de la vache folle

1998 : polémique autour des OGM

1999 : naufrage du navire-citerne Erika

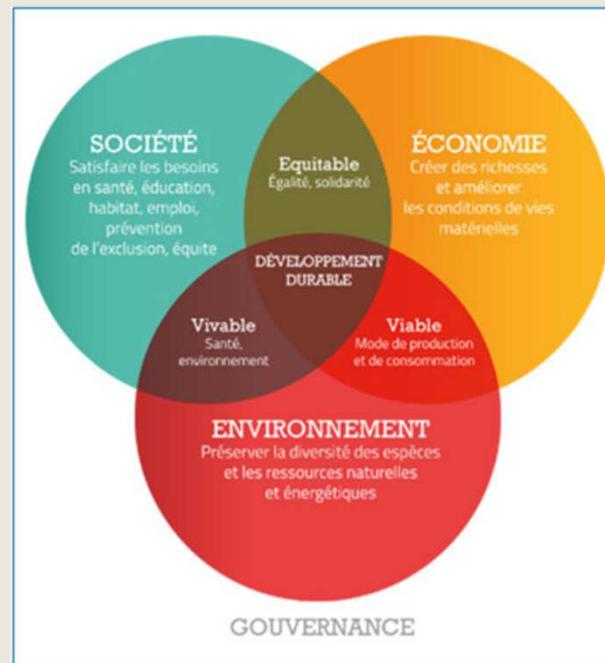
2001 : accident usine AZF à Toulouse



Consacre le terme développement durable

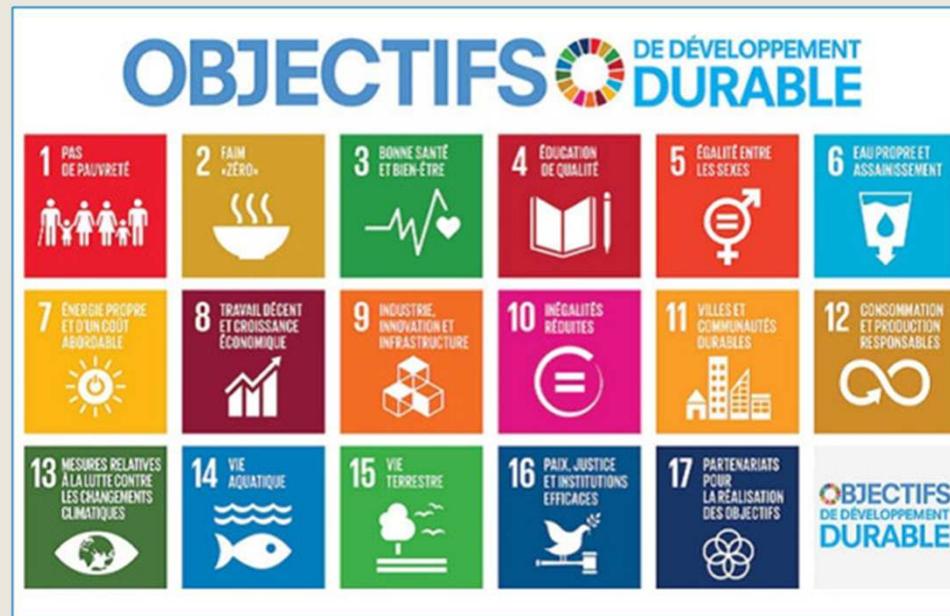
Source : Perreau S., Pauchard JC, Hafiani EM. Développement durable : définition, concept et construction historique. Le Praticien en Anesthésie Réanimation Vol. 25, Issue 4, septembre 2021, pp175-180

Développement durable : les 3 piliers



Source : Perreau S., Pauchard JC, Hafiani EM. Développement durable : définition, concept et construction historique. Le Praticien en Anesthésie Réanimation Vol. 25, Issue 4, septembre 2021, pp175-180

Objectifs du développement durable de l'ONU



Source : Perreau S., Pauchard JC, Hafiani EM. Développement durable : définition, concept et construction historique. Le Praticien en Anesthésie Réanimation Vol. 25, Issue 4, septembre 2021, pp175-180

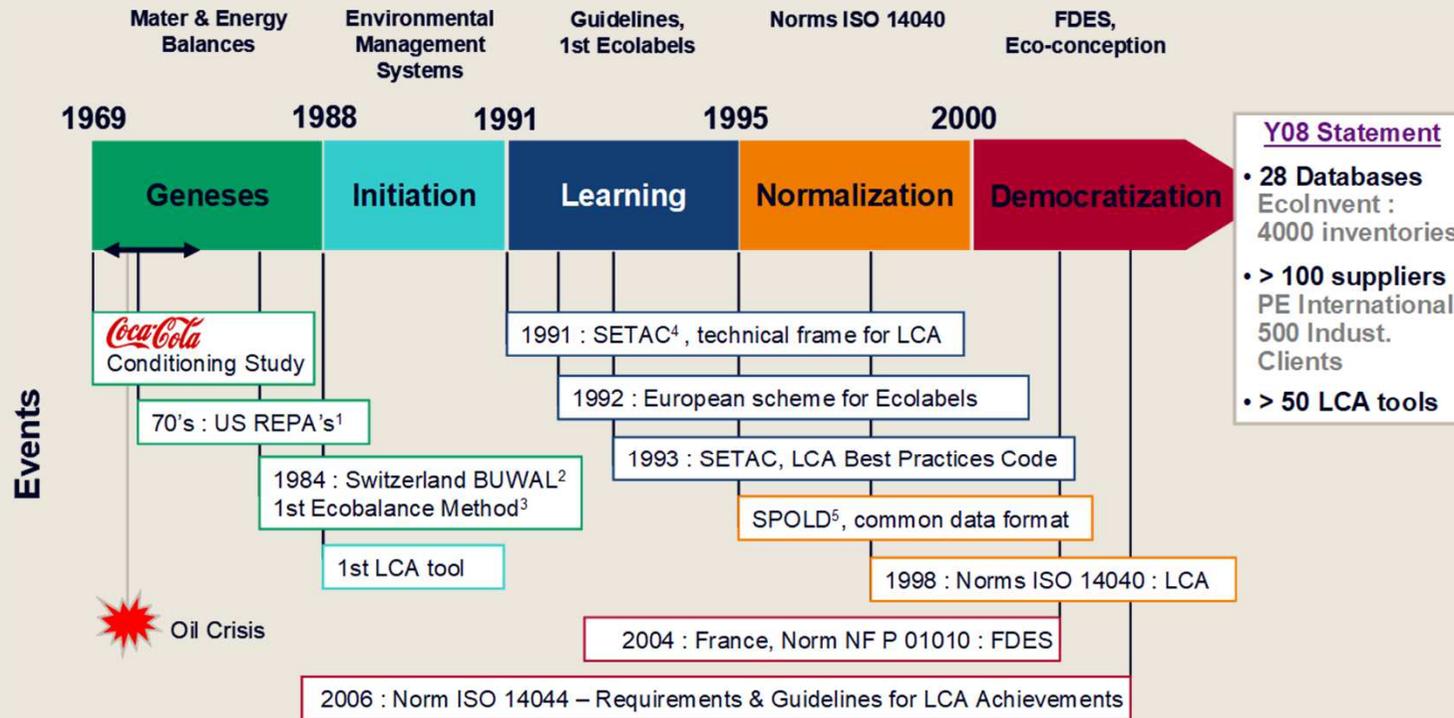
Vers l'ACV

- Comment peut-on traduire ces dysfonctionnements en termes d'impacts sur l'environnement ?
- Comment peut-on les quantifier ?
- Une possibilité de réponse : l'analyse de cycle de vie : méthode multi-étapes et multicritères

L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE



Histoire de l'ACV



¹ REPA = Resources & Environmental Profiles Analysis

² BUWAL = Swiss Department for Environment

³ Ecobalance = Comprehensive inventory of mater fluxes coming in & going out

⁴ SETAC = Society of Environmental Toxicology & Chemistry

⁵ SPOLD = Society for the Promotion of LCA Development

Sources : L'Analyse de Cycle de Vie d'un produit ou d'un service
Académie des Technologies -ACV

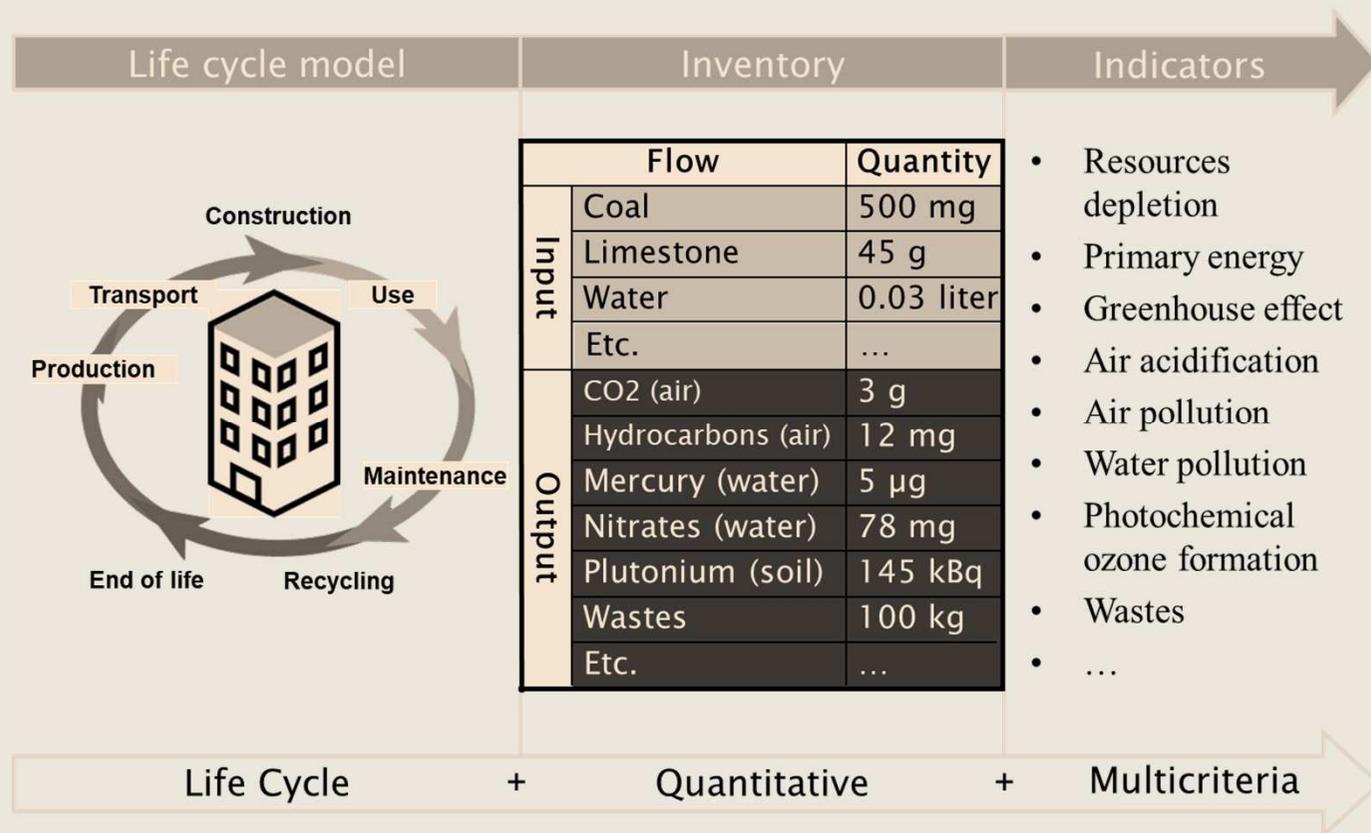
Définition de l'ACV

- Évaluation de l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière
- Prise en considération de toutes les étapes de son cycle de vie (« du berceau à la tombe »)
- Identification des points sur lesquels un produit peut être amélioré
- Contribution au développement de nouveaux produits
- Objectif premier : la comparaison des charges environnementales
 - *De différents produits, processus ou systèmes entre eux*
 - *Des différentes étapes du cycle de vie d'un même produit*

Principes (norme NF EN ISO 14040)

- Perspective du cycle de vie
- Intérêt environnemental
- Approche relative et unité fonctionnelle
- Approche itérative
- Transparence
- Complétude
- Priorité de l'approche scientifique

Résumé

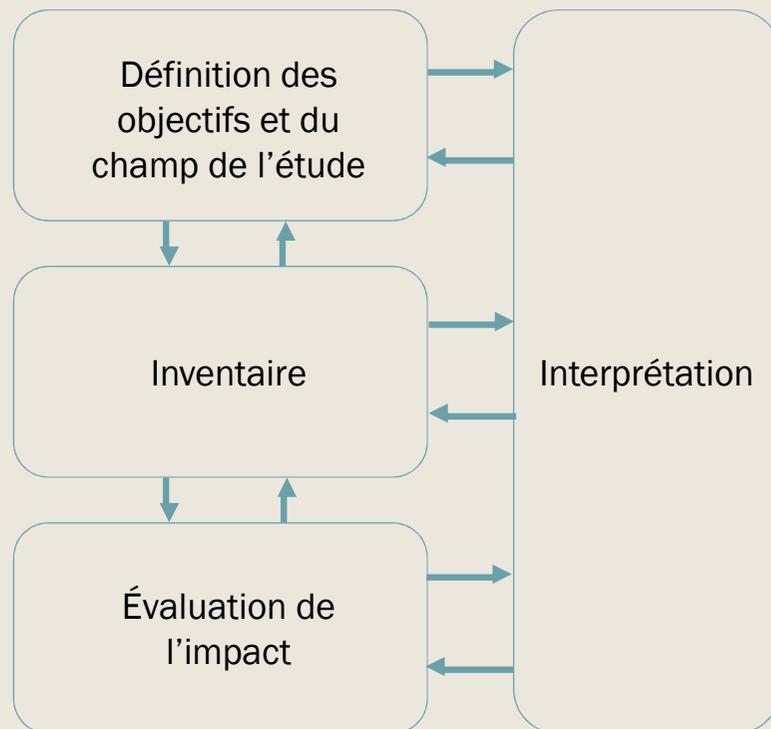


Source : Cours « Analyse de Cycle de Vie », ENS, 2022, Adélaïde Feraille

Normalisation

- Les principales normes internationales
 - *NF EN ISO14040:2006 Management environnemental – Analyse du Cycle de Vie – Principe et cadre*
 - *NF EN ISO14044:2006 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*
- Les principales normes françaises pour l'application dans la construction
 - *NF EN 15804 + A2:2019 Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*
 - *NF EN 15643-5:2017 Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution des bâtiments et des ouvrages de génie civil au développement durable - Partie 5 : Cadre méthodologique définissant les principes et les exigences spécifiques*

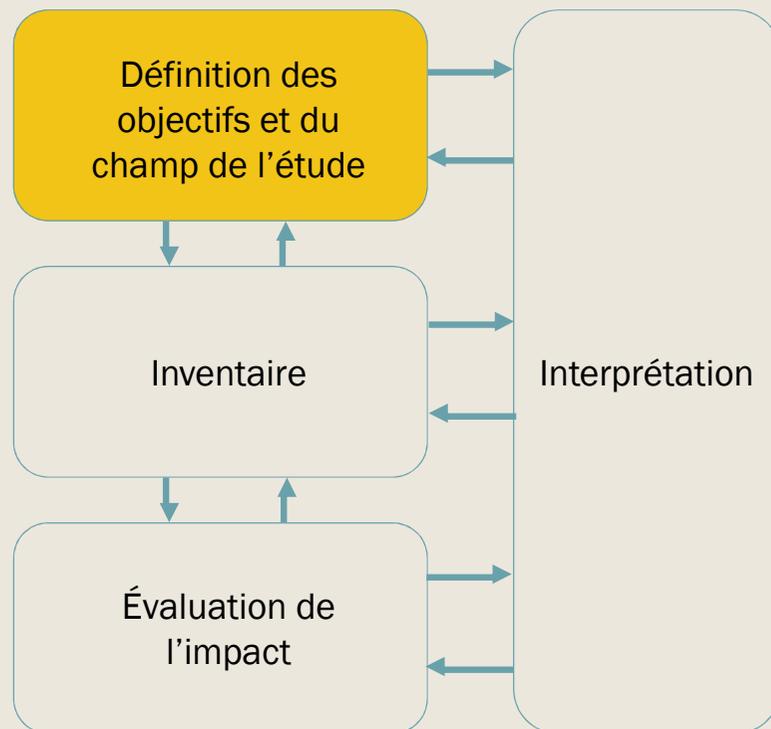
Étapes de l'ACV



NF EN ISO 14040 : 2006

- 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :**
 - *Délimitation des frontières du système étudié*
 - *Choix de l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les ICV et impacts)*
 - *Hypothèses sur le système (ex. durée de vie)*
 - *Public destinataire...*
- 2. Inventaire du cycle de vie (ICV) :** Identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, choix de modélisation...
- 3. Évaluation de l'impact :** Agrégation des différents flux recensés lors de l'ICV en impacts environnementaux; normalisation, pondération
- 4. Interprétation :** Discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes (recalcul fréquent, évaluation des conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir d'études de sensibilité), choix de représentation des résultats.

Étapes de l'ACV



NF EN ISO 14040 : 2006

- 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :**
 - *Délimitation des frontières du système étudié*
 - *Choix de l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les ICV et impacts)*
 - *Hypothèses sur le système (ex. durée de vie)*
 - *Public destinataire...*
- 2. Inventaire du cycle de vie (ICV) :** Identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, choix de modélisation...
- 3. Évaluation de l'impact :** Agrégation des différents flux recensés lors de l'ICV en impacts environnementaux; normalisation, pondération
- 4. Interprétation :** Discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes (recalcul fréquent, évaluation des conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir d'études de sensibilité), choix de représentation des résultats.

Étape 1

Objectifs possibles d'une ACV

- Pour les politiques industrielles
 - *Choix de conception*
 - *Amélioration de produits*
 - *Choix de procédés*
 - *Optimisation de la fin de vie des produits et des emballages*
 - *Recherche de solutions pour répondre à une réglementation environnementale*
 - *Déclaration environnementale de produits ...*
- Pour les politiques publiques
 - *Choix de filières de valorisation*
 - *Critères d'écolabellisation des produits*
 - *Orienter des choix ...*

Étape 1

Définir une unité fonctionnelle

- Elle doit répondre aux questions : Quoi (quelle fonction) ? Combien ? Comment ?
Combien de temps ?
- Définir l'unité fonctionnelle par une phrase à l'infinitif
 - *Transporter x tonnes sur une distance de y km*
 - *Emballer un volume donné de liquide*
- Une fois l'unité fonctionnelle définie, en déduire le flux de référence (quantité associée)
 - *Transport d'1 tonne . Km*
 - *Emballage d'1 litre de liquide*
- L'unité fonctionnelle est l'unité à laquelle seront rapportés tous les inventaires de cycle de vie et d'impacts

Étape 1

Exercice sur l'unité fonctionnelle

- Définir une unité fonctionnelle pour les exemples suivants :
 - *Sacs de caisse ?*
 - *Peinture ?*
 - *Stylo bille / Stylo plume ?*
 - *Lunettes / Lentilles de contact ?*

Étape 1

Exercice sur l'unité fonctionnelle

- Sacs de caisse : Emballer 9000L (9000L : moyenne des courses pendant un an par européen moyen)
- Peinture : Couvrir 1 m² de mur en plâtre avec un degré d'opacité de 0,98 et pour une durée de vie 10 ans.
- Stylo bille / Stylo plume : Ecrire sur une distance de 90 km (= comparaison de 30 stylos bille/ 1 stylo plume + 150 cartouches d'encre en phase d'utilisation)
- Lunettes / Lentilles de contact : Corriger l'hypermétropie pendant 3 ans (prendre en compte étui à lunettes, produit d'entretien conditionné / boîte de rangement / flacon individuel)

Étape 1

Exercice Multiétapes

- Les ampoules fluorescentes sont plus efficaces que les ampoules incandescentes mais elles contiennent du mercure. Ce mercure peut être relâché dans l'environnement si les ampoules sont mises en décharge sans précaution.
- Une société qui produit des ampoules fluorescentes est attaquée sur les risques de pollution au mercure par les ampoules en fin de vie. L'électricité utilisée sur le marché de la société en question est produite dans une centrale thermique à charbon.
- Qu'en pensez vous ?

Étape 1

Exercice Multiétapes

■ Données :

- *Contenu en mercure d'une ampoule fluorescente : 5mg*
- *Emissions de mercure d'une centrale électrique à charbon : 0.04mg/kWh*
- *Durée de vie des ampoules :*
 - *Fluorescentes : 10000h*
 - *Incandescentes : 1000h*

■ Puissance consommée pour produire 950 lumens :

- *Fluorescentes : 17W*
- *Incandescentes : 60W*

Étape 1

Exercice Multiétapes

- Ampoules incandescentes :

- *Mercuré consommé par une ampoule pour 1000h =*
 $0,04\text{mg/kWh} * 1000\text{h} * 60 \cdot 10^{-3}\text{kW} = 2,4 \text{ mg}$

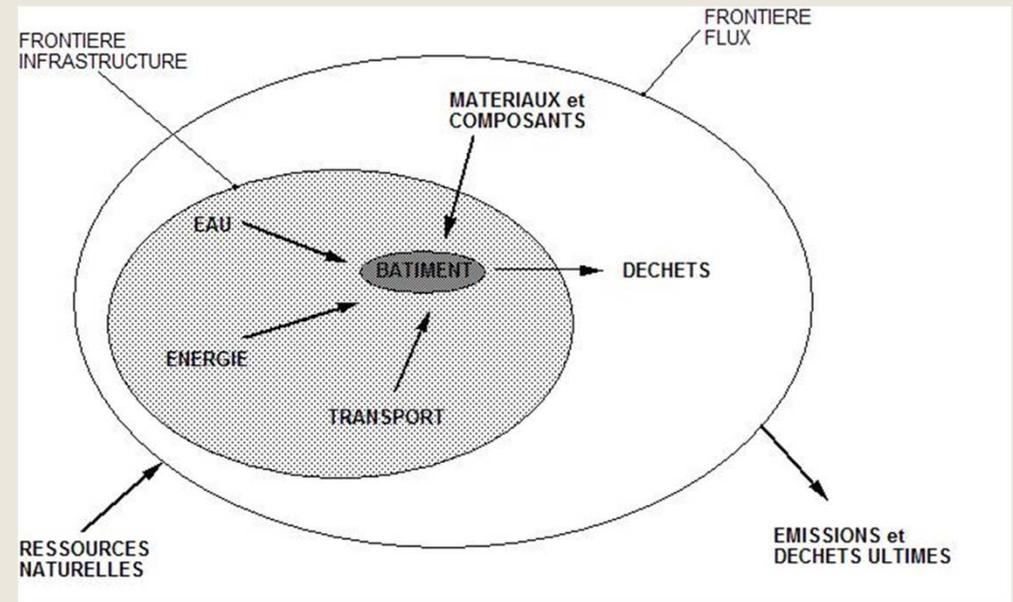
- Ampoules fluorescentes :

- *Mercuré consommé par une ampoule pour 10000h = 5 +*
 $0,04\text{mg/kWh} * 10000\text{h} * 17 \cdot 10^{-3}\text{kW} = 11,8 \text{ mg}$

Étape 1

Délimiter les frontières du système

- Dépendent de l'objet de l'étude
- Le système est étendu à la fabrication de tous les intrants et au traitement de tous les produits/déchets à chaque étape
- Il existe des règles de négligeabilité, basées sur des critères tels que la masse, l'énergie, la toxicité (ex. <5% de la masse des intrants)



Étape 1

Hypothèses

- Energie

- *Mix de production d'électricité, différences selon les usages (chauffage, ecs, éclairage, froid, autres usages), mix spécifique (différents fournisseurs/tarifs) ou moyen, national ou européen, variation dans le temps, valeurs moyennes*

- Transport

- *Retour à vide des camions ou gestion optimisée, prise en compte des infrastructures*

- Recyclage

- *Début et fin de vie, stocks ou impacts évités, boucle ouverte ou fermée*

Étape 1

Hypothèses : Principe de l'allocation

- L'élaboration d'une matière première (ou produit) génère très souvent aussi des déchets ou des coproduits. Or à une ACV ne correspond qu'un seul produit. La prise en compte de l'impact environnemental de ces déchets ou coproduits s'effectue alors indirectement par l'attribution d'allocations.
- L'allocation est le moyen consistant à imputer au coproduit une fraction des intrants et des sortants (les flux) du produit principal et donc d'affecter aux coproduits les impacts environnementaux générés par sa création.
- Ces flux peuvent par exemple être attribués selon la masse, la valeur marchande ou le volume relatif entre produit et coproduit.

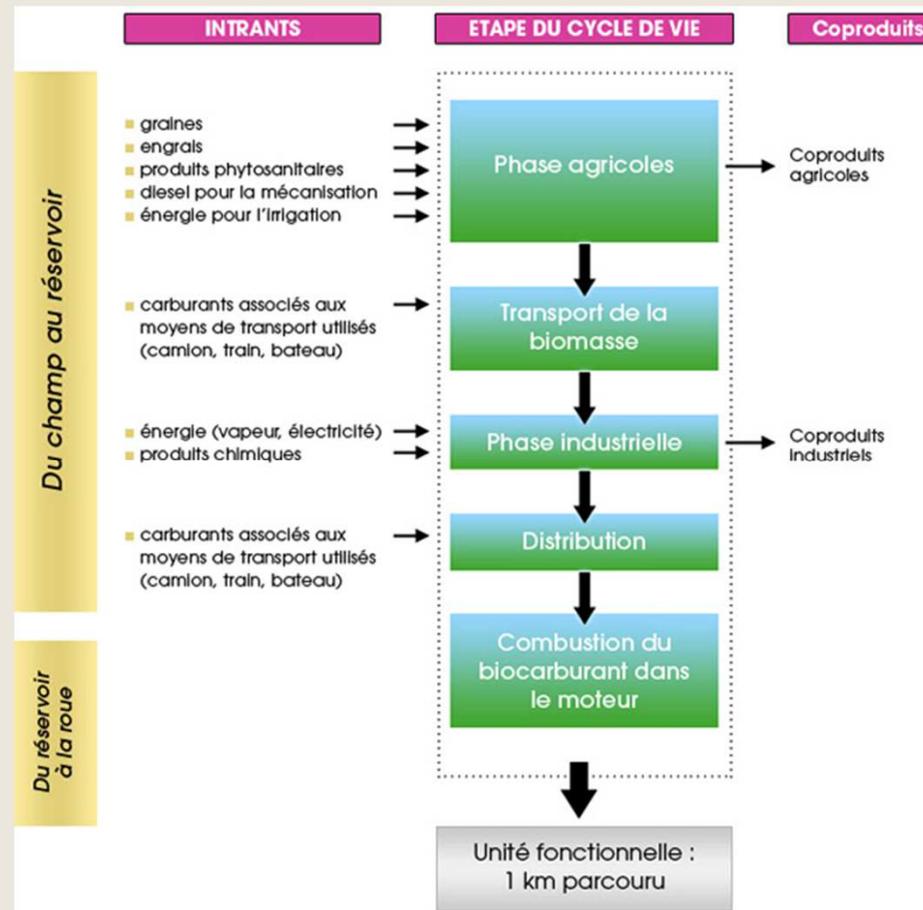
Étape 1

Hypothèses : Comment définir l'allocation ?

- Eviter l'allocation en faisant une extension du système ou en subdivisant les processus
- Allocations physiques (massique, stœchiométrique, ...)
- Autres critères d'allocations (économiques, ...)

Étape 1

Les allocations : exemple d'une bioraffinerie de blé

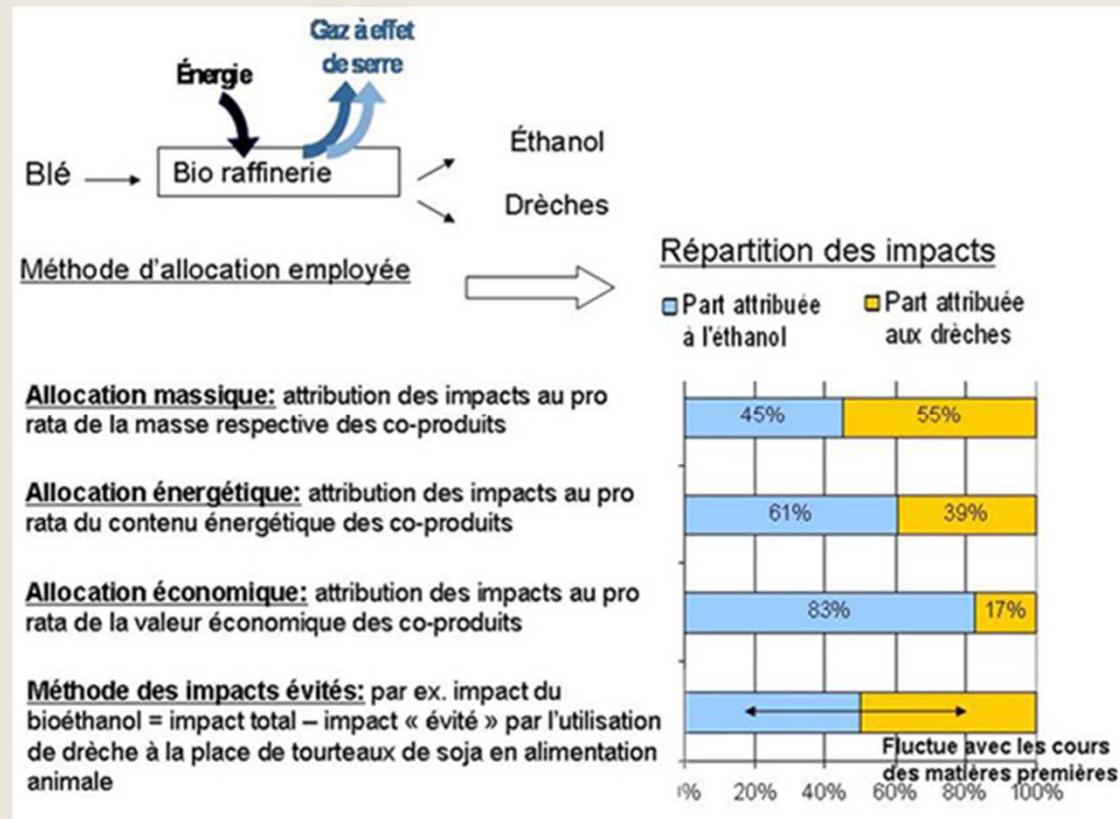


drèches

éthanol

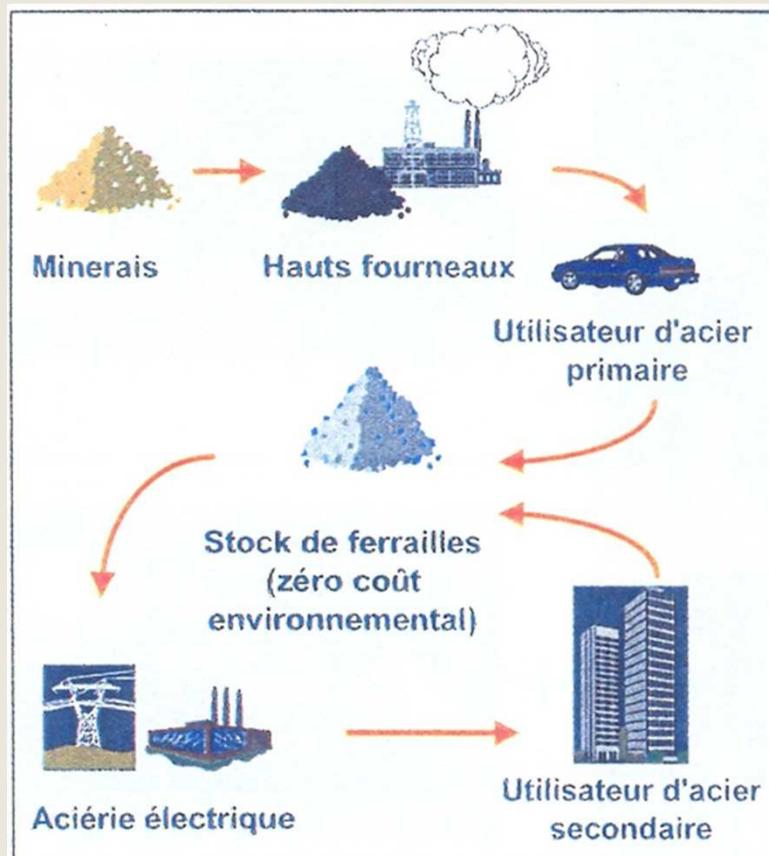
Étape 1

Les allocations : exemple d'une bioraffinerie de blé



Étape 1

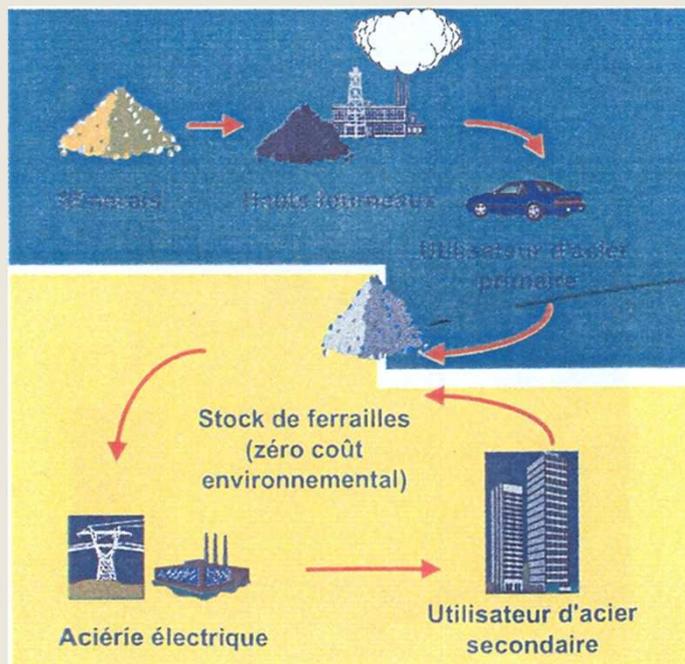
Les allocations : ex. le recyclage de l'acier



- Deux filières interconnectées
- Question posée : Comment répartir les impacts de la production d'acier primaire et secondaire entre les deux filières automobile et bâtiment ?

Étape 1

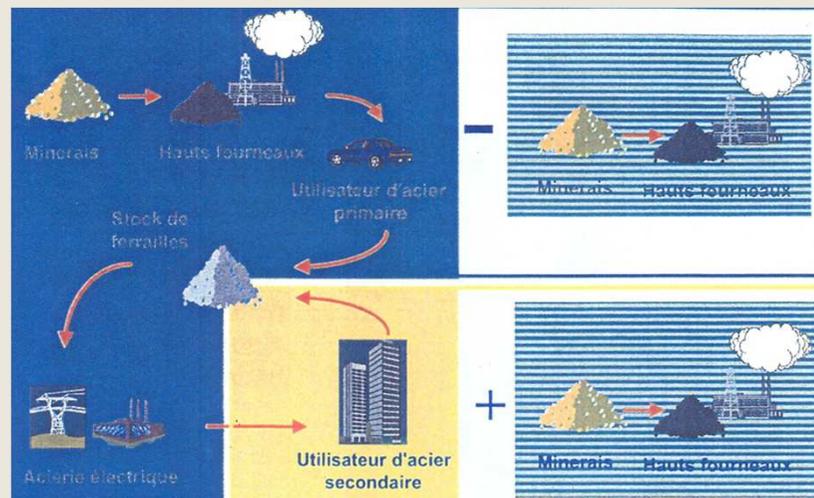
Les allocations : ex. le recyclage de l'acier



- Imputation : méthode dite du stock
- Lors de l'ACV du produit en acier primaire, on considère 0 déchet pour l'utilisateur de l'acier primaire mais on lui impute toute la matière première.
- Lors de l'ACV du produit en acier secondaire pas de coût environnemental lié à l'acier.

Étape 1

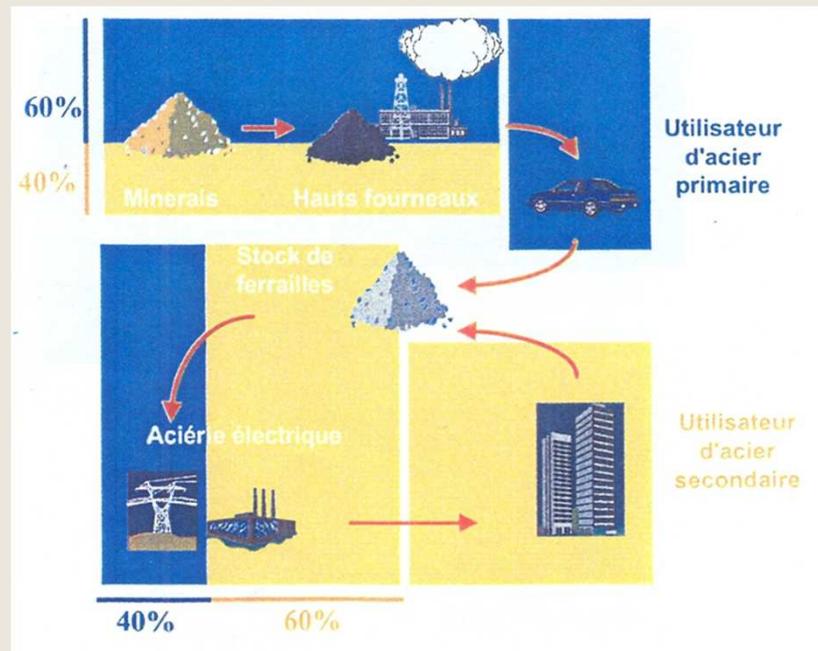
Les allocations : ex. le recyclage de l'acier



- Imputation : méthode des impacts évités
- Lors de l'ACV du produit en acier secondaire, on lui impute le coût environnemental lié aux matériaux utilisés, alors retiré lors de l'ACV du produit en acier primaire.
- Satisfaisant pour l'automobile, moins pour le bâtiment

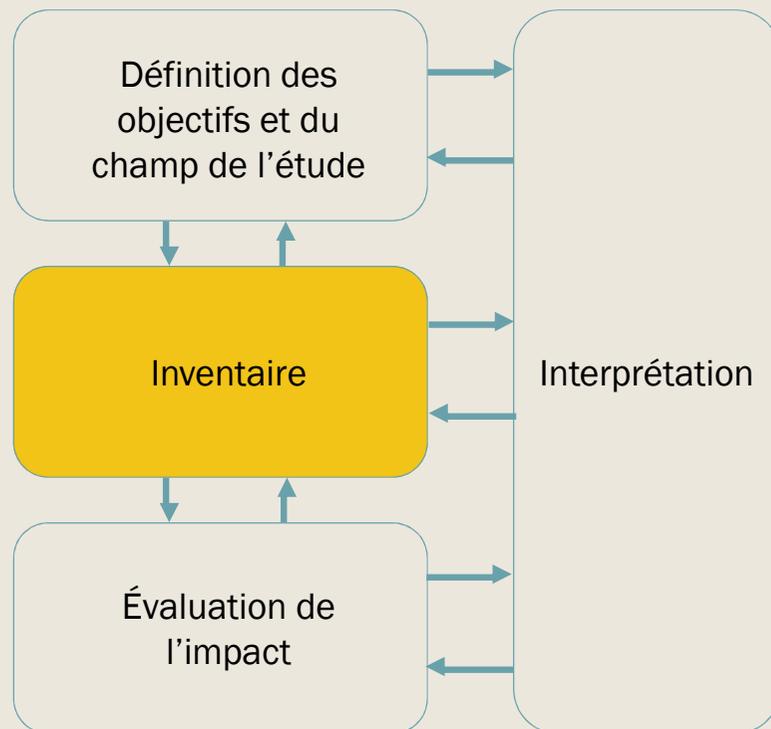
Étape 1

Les allocations : ex. le recyclage de l'acier



- Imputation : se mettre entre ces deux cas polaires
- Nécessité d'une analyse de sensibilité pour justifier le choix méthodologique et la répartition.

Étapes de l'ACV



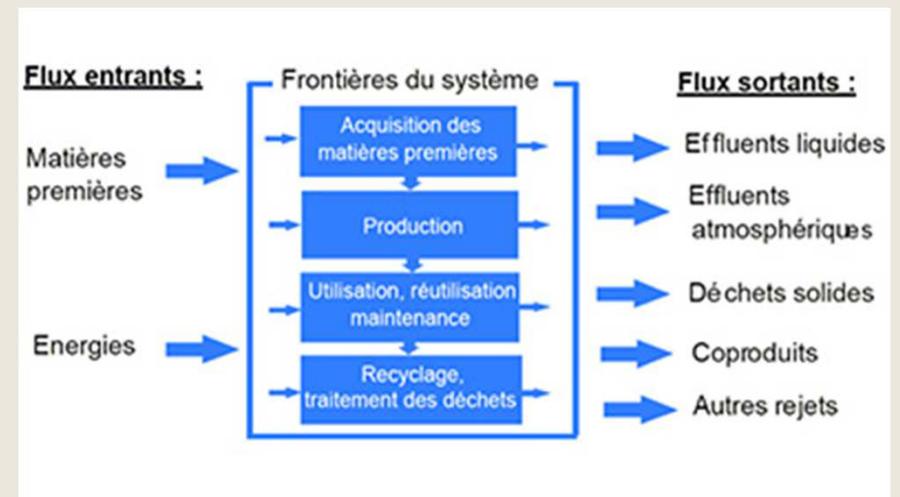
NF EN ISO 14040 : 2006

- 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :**
 - *Délimitation des frontières du système étudié*
 - *Choix de l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les ICV et impacts)*
 - *Hypothèses sur le système (ex. durée de vie)*
 - *Public destinataire...*
- 2. Inventaire du cycle de vie (ICV) :** Identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, choix de modélisation...
- 3. Évaluation de l'impact :** Agrégation des différents flux recensés lors de l'ICV en impacts environnementaux; normalisation, pondération
- 4. Interprétation :** Discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes (recalcul fréquent, évaluation des conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir d'études de sensibilité), choix de représentation des résultats.

Étape 2

Inventaire

- Inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants, associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue
 - *Matières premières, combustibles...*
 - *Émissions dans l'air*
 - *Émissions dans l'eau*
 - *Émissions dans le sol, déchets*
- Il s'agit d'une comptabilité analytique des flux
- Cette étape de collecte de données est primordiale



Source : ADEME

Étape 2

Types de données collectées

- Facteurs d'activité
 - *kWh consommés*
 - *km parcourus*
 - *tonnes transportées*
 - ...
- Facteurs d'émission
 - *g de NO_x émis dans l'air*
 - *g de PO₄ émis dans l'eau*
 - ...
- Ces données spécifiques (ou primaires) peuvent être complétées par des données génériques (ou secondaires), issues de la bibliographie ou de calculs, lorsque les premières ne suffisent pas ou lorsqu'elles ne sont pas accessibles (source : ADEME)

Étape 2

Représentativité des données

- Sources de données très différentes
 - *Bases de données (Ecoinvent, ELCD , INIES, DIOGEN)*
 - *Agrégation de données provenant de sources différentes*
- Représentativité géographique
 - *Données mondiales, européennes, françaises ...*
- Représentativité technologique
 - *Comment ont été obtenues les données ?*
 - *Importance des données mesurées*
- Existence de modes d'évaluation des données
 - *Ex. matrice Pedigree*

Étape 2

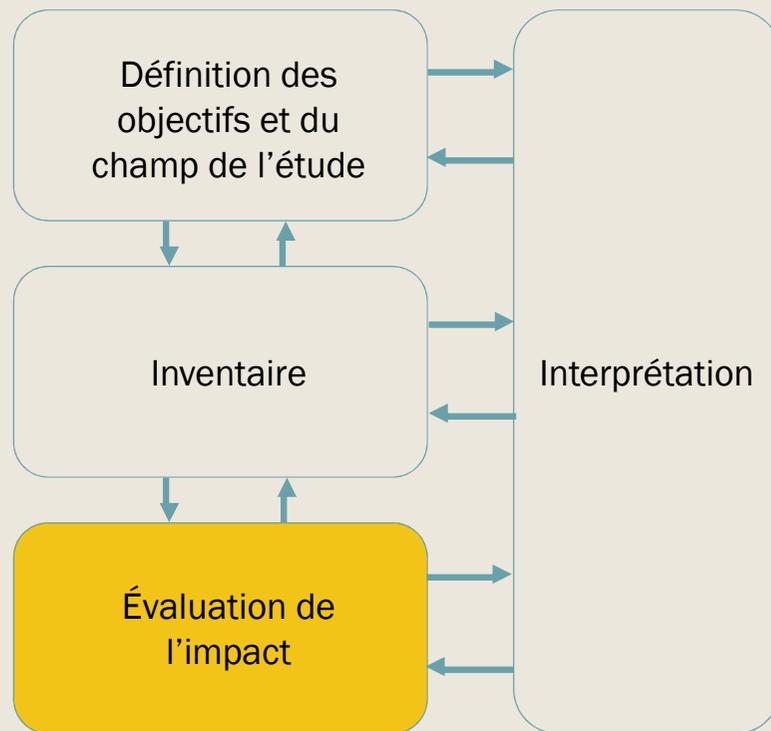
Exemple d'ICV – Mug en céramique

Ceramic mug production				
Ceramics	Input	310	g	sanitary ceramics production sanitary ceramics Cutoff, U - CH
Painting	Input	5	g	alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60% solution state alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state Cutoff, U - RER
Transport	Input	0,09	t*km	transport, freight, lorry, all sizes, EURO3 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - RER
Transport	Input	5,17417	t*km	transport, freight, sea, transoceanic ship transport, freight, sea, transoceanic ship Cutoff, U - GLO
Ceramic mug	Output	1	Item(s)	
Mug washing				
Tap water	Input	0,14	kg	tap water production, conventional treatment tap water Cutoff, U - Europe without Switzerland
Electricity	Input	0,0504	MJ	electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U -

Detergent component	Input	0,7	g	soap production soap Cutoff, U - RER
Non-ionic surfactant	Input	0,7*0,05	g	market for non-ionic surfactant non-ionic surfactant Cutoff, U - GLO
Builder	Input	0,7*0,05	g	polycarboxylates production, 40% active substance polycarboxylates, 40% active substance Cutoff, S - RER
Bleaching agent	Input	0,7*0,15	g	sodium perborate production, monohydrate, powder sodium perborate, monohydrate, powder Cutoff, S - RER
Water softener	Input	0,7*0,05	g	sodium phosphate production sodium phosphate Cutoff, U - RER
Waste water treatment	Input	-0,00014	m ³	treatment of wastewater, from residence, capacity 1.1E10/year wastewater, from residence Cutoff, U - CH
Ceramic mug	Input	broken	Item(s)	
Broken mug	Output	broken	Item(s)	
Clean mug - dishwasher	Output	clean	Item(s)	
Waste treatment				
Broken mug	Input	1	Item(s)	

Source : Extrait d'openLCA (1.7.2)
Case Study Ceramic cup vs. Paper cup de 2018

Étapes de l'ACV



NF EN ISO 14040 : 2006

- 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :**
 - *Délimitation des frontières du système étudié*
 - *Choix de l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les ICV et impacts)*
 - *Hypothèses sur le système (ex. durée de vie)*
 - *Public destinataire...*
- 2. Inventaire du cycle de vie (ICV) :** Identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, choix de modélisation...
- 3. Évaluation de l'impact :** Agrégation des différents flux recensés lors de l'ICV en impacts environnementaux; normalisation, pondération
- 4. Interprétation :** Discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes (recalcul fréquent, évaluation des conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir d'études de sensibilité), choix de représentation des résultats.

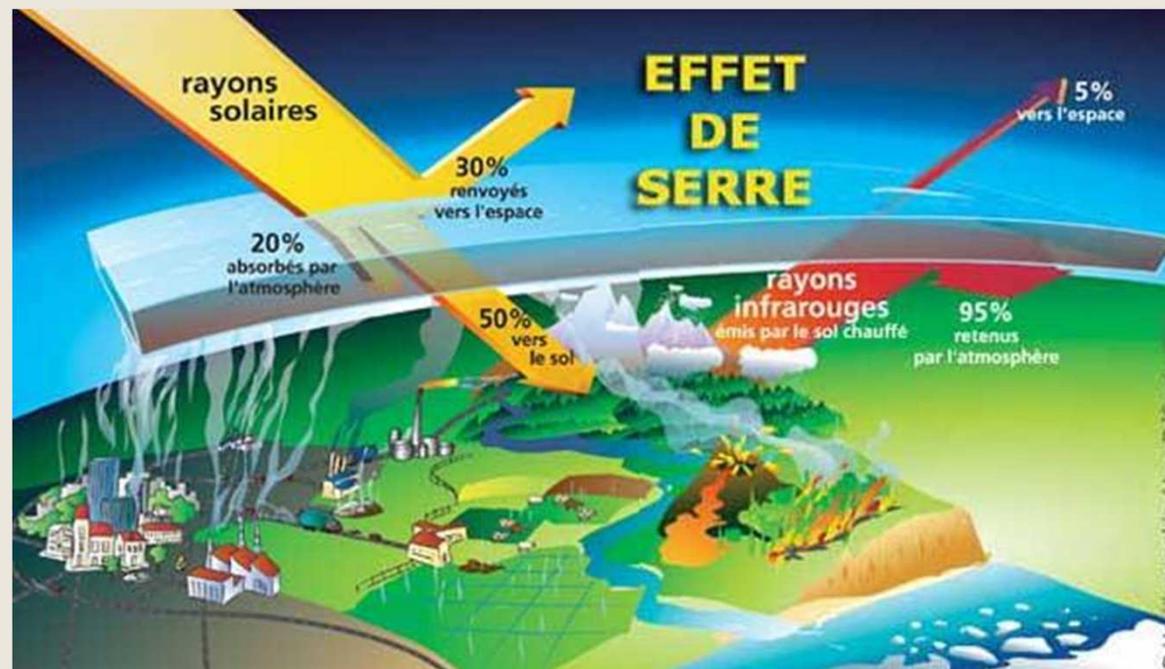
Étape 3

Impact changement climatique (GES)

- Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP) permet de comparer entre eux les GES (en kg eq CO₂).
- Le PRG d'un gaz est le rapport entre les effets causés par la libération d'une masse donnée de ce gaz et ceux causés par la même masse de CO₂
- La valeur du PRG d'un gaz dépend de la vitesse de disparition de ce gaz dans l'atmosphère
- Principaux gaz à effet de serre :
 - *Vapeur d'eau*
 - *CO₂*
 - *Méthane*
 - *Protoxyde d'azote N₂O*
 - *Composés hydrocarbures halogénés (fréon, CFC, ...)*

Étape 3

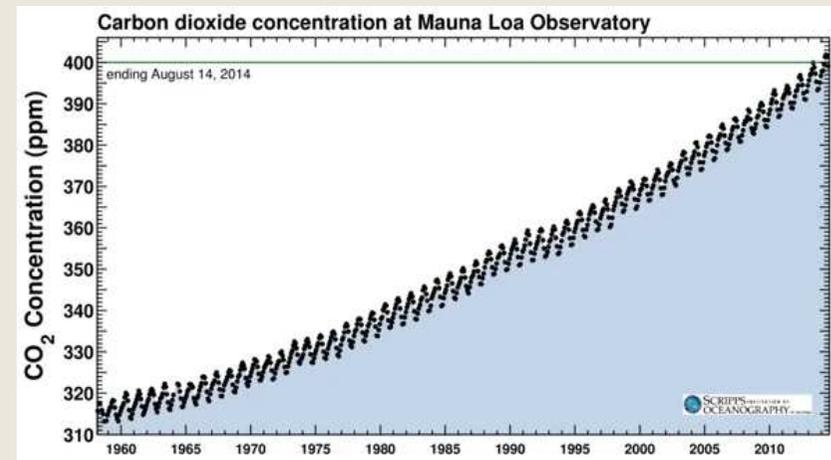
Effet de serre



Étape 3

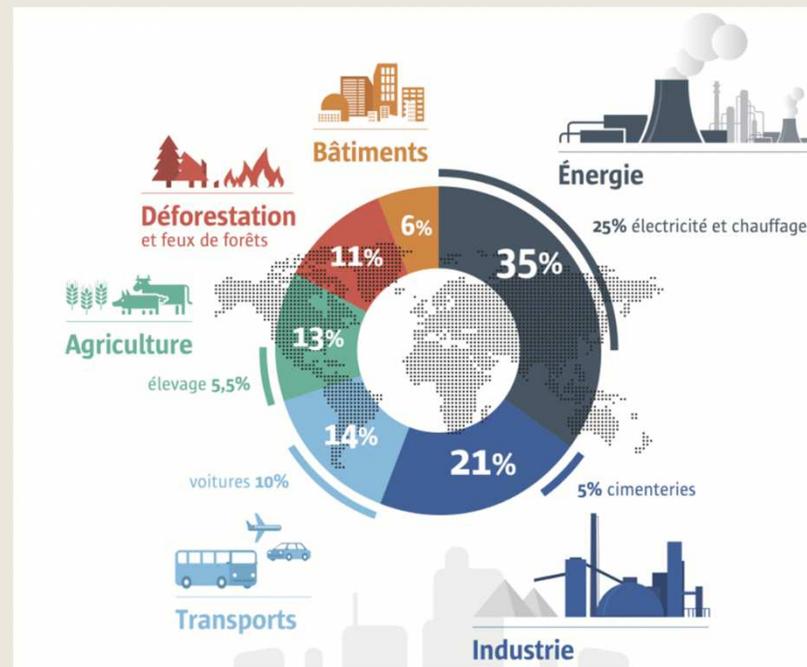
Evolution des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère

- 2017 : 405.5 ppm (46% plus élevée qu'avant 1750, époque pré-industrielle)
- 2016 : 403.3 ppm
- 2013 : 399.89 ppm (1) (Sommet de Varsovie)
- 2011 : 391.57 ppm
- 2010 : 389.78
- 2009 : 387.38 (sommet de Copenhague)
- 2008 : 385.59
- 2007 : 383.77 (conférence de Bali)
- 2006 : 381.90
- 1997 : 363.71 (protocole de Kyoto)
- 1992 : 356.38 (Sommet de la Terre à Rio de Janeiro)
- 1987 : 349.16 (dernière année avec un niveau de CO₂ inférieur à 350 ppm : limite considérée comme ne devant pas être dépassée)
- 1959 : 315.97 (1ère année complète de données précises)



Étape 3

Source d'émissions de GES dans le monde



Source : 5^{ème} rapport du GIEC

Étape 3

Principe de calcul d'un indicateur

$$\text{Indicateur global d'impact} = \sum_i \text{Quantité de composant } i \times \text{Facteur d'impact du composant } i$$

Étape 3

Calcul d'indicateur d'impact : ex. effet de serre

Emissions contribuant à l'effet de serre

Modélisation de la contribution relative à l'effet de serre

Inventaire du produit

	Coefficient (PRG)	Valeur inventaire pour 1kg de produit	Contribution à l'effet de serre
CO ₂	1	472	
CH ₄	25	0.5	
N ₂ O	298	0.03	
HCFC22	1810	0.06	
		Total	

Étape 3

Calcul d'indicateur d'impact : ex. effet de serre

Emissions contribuant à l'effet de serre

Modélisation de la contribution relative à l'effet de serre

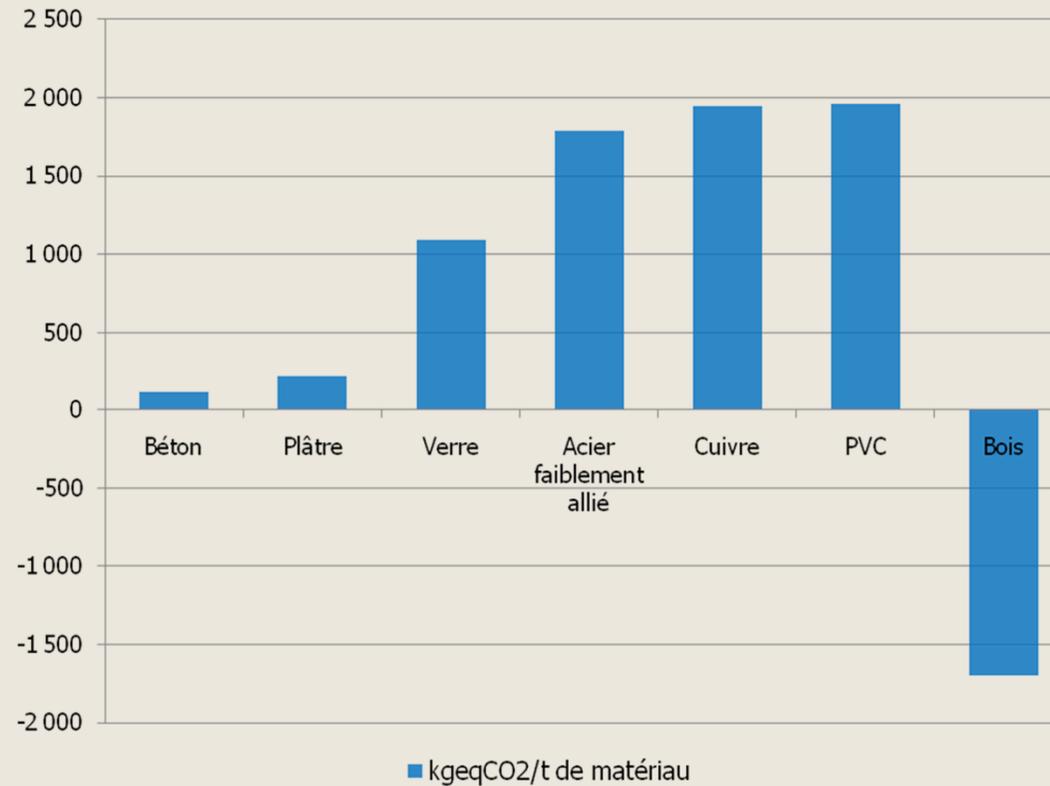
Inventaire du produit

	Coefficient (PRG)	Valeur inventaire pour 1kg de produit	Contribution à l'effet de serre
CO ₂	1	472	472
CH ₄	25	0.5	12.5
N ₂ O	298	0.03	8.94
HCFC22	1810	0.06	108.6
		Total	602.04

Étape 3

Exemples de matériaux

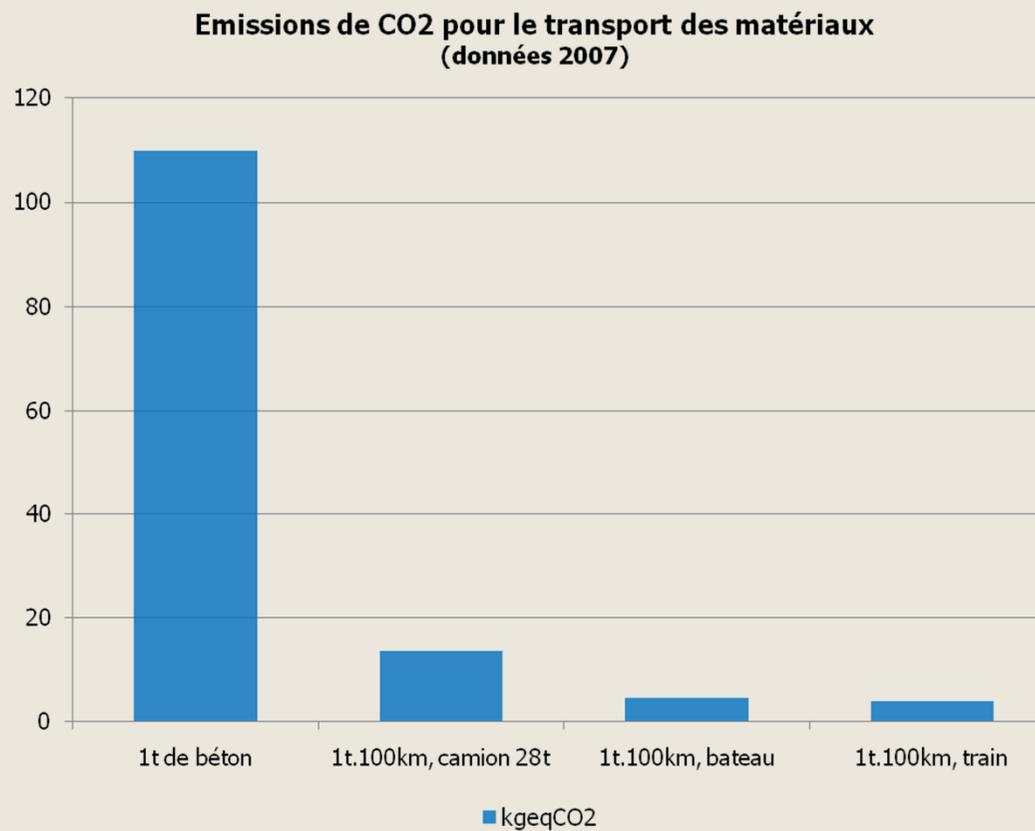
Emissions de CO2 pour la production des matériaux
(données 2007)



Source : Bruno Peuportier

Étape 3

Transport des matériaux



Source : Bruno Peuportier

Étape 3

Eutrophisation



- Définition : Détérioration d'un écosystème aquatique par la prolifération de certains végétaux
- Causes :
 - *rejet d'origine anthropique de nitrates (engrais azotés par exemple),*
 - *rejet de phosphates (lessives par exemples)*
 - *rejet de matières organiques.*
- Conséquences :
 - *prolifération des algues planctoniques et de certains types de zooplancton,*
 - *modification des caractéristiques physiques et chimiques de l'eau,*
 - *disparition ou forte réduction du nombre d'animaux et de certains végétaux,*
 - *réduction de la teneur en oxygène, etc.*

Étape 3

Acidification

- L'acidification est liée aux émissions de trois polluants :
 - le dioxyde de soufre (SO_2),
 - les oxydes d'azote (NO_x)
 - l'ammoniac (NH_3).
- Ils retombent en partie à proximité des sources émettrices, mais peuvent aussi être transportés par l'atmosphère sur de longues distances. Ils exercent donc leurs effets tant à l'échelle locale qu'au niveau d'un continent entier.
- Nombreuses réactions chimiques complexes au cours du transport dans l'atmosphère.
 - Exemple: SO_2 et NO_x sont oxydés et se transforment respectivement en acide sulfurique et acide nitrique.
- Tous ces polluants évoluent différemment dans l'atmosphère et retombent sous forme de retombées sèches (retombent au sol sans modification chimique : poussières, gaz) ou humides (« pluies acides »).
- La pluie acide a lieu lorsque les polluants transformés en acides se combinent aux molécules d'eau (H_2O) pour former des composés « humides ». Les retombées humides sont les pluies, le brouillard et la neige.



Étape 3

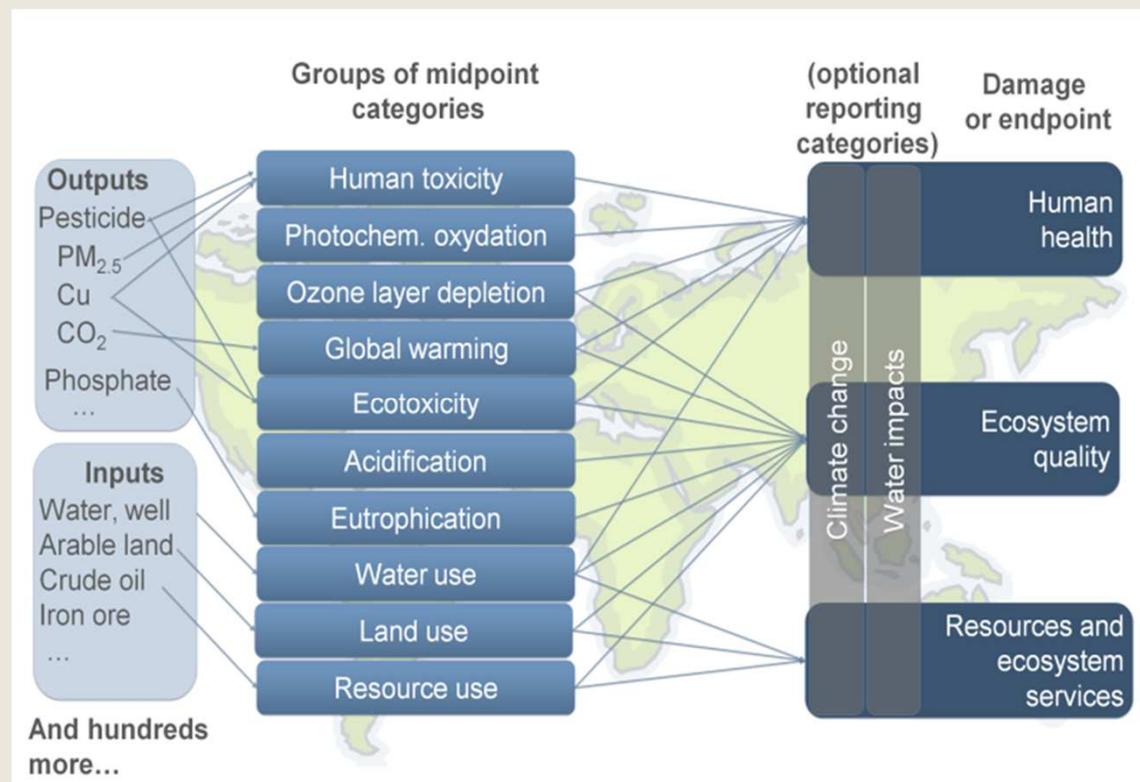
Toxicité et écotoxicité



- Plusieurs méthodes existantes :
 - *Méthodes des volumes critiques*
 - Très simple mais très limitée
 - *Modélisation du devenir des substances toxiques dans l'environnement*
 - Plus complexe mais plus fiable
- Effets :
 - *Écosystèmes : dégradations des milieux récepteur puis destruction d'espèces (ex : toxicité des hydrocarbures -> marées noires)*
 - *Santé humaine : augmentation des maladies ou cancers*

Étape 3

Indicateurs orientés problème/dommage



Étape 3

Méthode d'impact

- Les méthodes de caractérisation regroupent plusieurs indicateurs d'impact, qui sont calculés dans le même temps, à partir du même ICV
- Exemple pour la méthode relative à la norme NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN

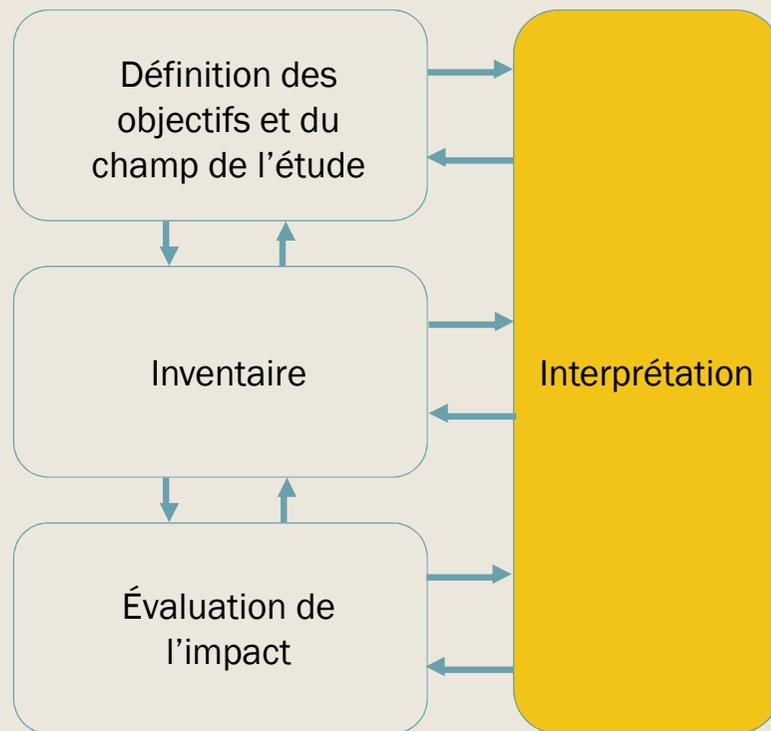
Indicateurs d'impact	Unité	Description
Réchauffement climatique	kg CO ₂ équivalent	Prend en compte les émissions des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique à un horizon de 100 ans
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC ⁻¹¹ équivalent	Prend en compte toutes les substances qui contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ équivalent	Liée à la pollution atmosphérique. L'acidification des sols génère un dépérissement des arbres. L'acidification de l'eau provoque une diminution de la biodiversité et augmente le risque de saturnisme et d'intoxication par l'aluminium
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ équivalent	Eutrophisation de l'eau. Introduction de nutriment dans les milieux aquatiques qui conduit à leur modification et à leur dégradation (augmentation de la production d'algues vertes)
Formation d'ozone photochimique	kg éthène équivalent	Oxydants photochimiques responsables de la formation d'ozone au niveau de la troposphère (smog de pollution au-dessus des villes en période estivale). Les substances à l'origine de cet impact sont le plus souvent les émissions de COV, CO et NOx.
Épuisement des ressources abiotiques (éléments)	kg Sb équivalent	Inclut toutes les ressources non renouvelables de matières abiotiques à l'exception des ressources fossiles (ex. : la consommation de minerais)
Épuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)	MJ, pouvoir calorifique inférieur	Inclut toutes les ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole brut)
Pollution de l'air	m ³	Calcul du volume fictif d'air (exprimé en m ³) par lequel il faudrait diluer chaque flux de l'inventaire pour le rendre conforme au seuil de l'arrêté*, et à faire la somme des volumes fictifs ainsi calculés. Permet de prendre en compte les impacts smog hivernal et écotoxicité de l'air. * Arrêté intégré du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toutes natures des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.
Pollution de l'eau	m ³	Principe équivalent à la pollution de l'air, en partant des émissions dans l'eau et dans le sol (on suppose ici qu'elles seront entraînées dans l'eau tôt ou tard). Permet de prendre en compte les impacts eutrophisation et écotoxicité de l'eau

Étape 3

Evolution des indicateurs

- Méthodes de calcul non figées : Modèles incertains, hypothèses révisées
- Données procédés en évolution : Procédés constamment modifiés
- Exemple du GWP
 - *Évolution des facteurs de caractérisation*
 - IPCC 2001 : CH₄: 23 ; SF₆: 22200
 - IPCC 2007 : CH₄: 25 ; SF₆: 22800
 - IPCC 2013 : CH₄: 30 ; SF₆: 26100
 - *Évolution des valeurs de cet indicateur*
 - Cuivre, Equer 2003 : 1.81 kg eq CO₂/kg
 - Cuivre, Equer 2007 : 1.946 kg eq CO₂/kg

Étapes de l'ACV



NF EN ISO 14040 : 2006

- 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :**
 - *Délimitation des frontières du système étudié*
 - *Choix de l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les ICV et impacts)*
 - *Hypothèses sur le système (ex. durée de vie)*
 - *Public destinataire...*
- 2. Inventaire du cycle de vie (ICV) :** Identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, choix de modélisation...
- 3. Évaluation de l'impact :** Agrégation des différents flux recensés lors de l'ICV en impacts environnementaux; normalisation, pondération
- 4. Interprétation :** Discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes (recalcul fréquent, évaluation des conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir d'études de sensibilité), choix de représentation des résultats.

Etape 4

Interprétation des résultats

- Identifier les enjeux significatifs
- Analyse de l'inventaire et des indicateurs d'impact
 - *Par étape du cycle de vie*
 - *Par composant ou matériau*
- Attention à considérer autant que possible les résultats obtenus avec leurs incertitudes et à replacer ces résultats dans le cadre de l'analyse (conditions de l'étude, hypothèses)
- Comparaison de scénarii alternatifs

Etape 4

Questions à se poser

- Chaque résultat a-t-il été interprété (inventaire brut, caractérisation, évaluation de l'impact) ?
- Quelles étapes du cycle de vie et quels polluants contribuent de façon dominante à l'impact environnemental ?
- Les différences entre scénarii sont elles significatives ?
- Quels sont les paramètres clés d'un point de vue environnemental ? (Etudes de sensibilité)
- Quelle est l'influence des hypothèses émises ? (Etudes de sensibilité)

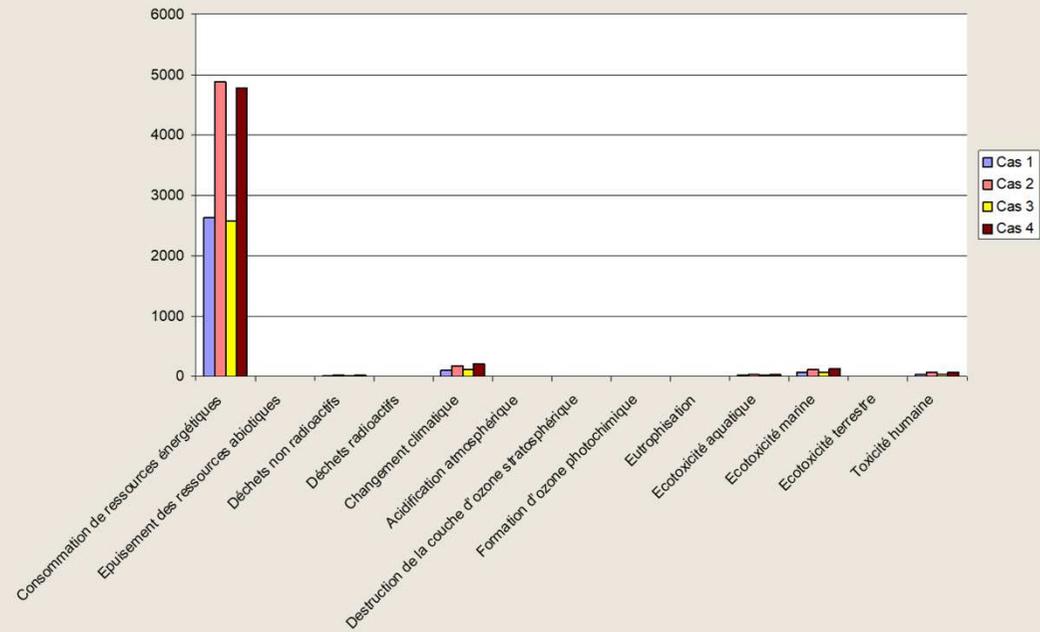
Etape 4

Normalisation

- Objectif : Représenter tous les indicateurs sur une même échelle, et mieux cerner l'importance de la contribution du produit aux différents impacts
- Diviser par une valeur de référence

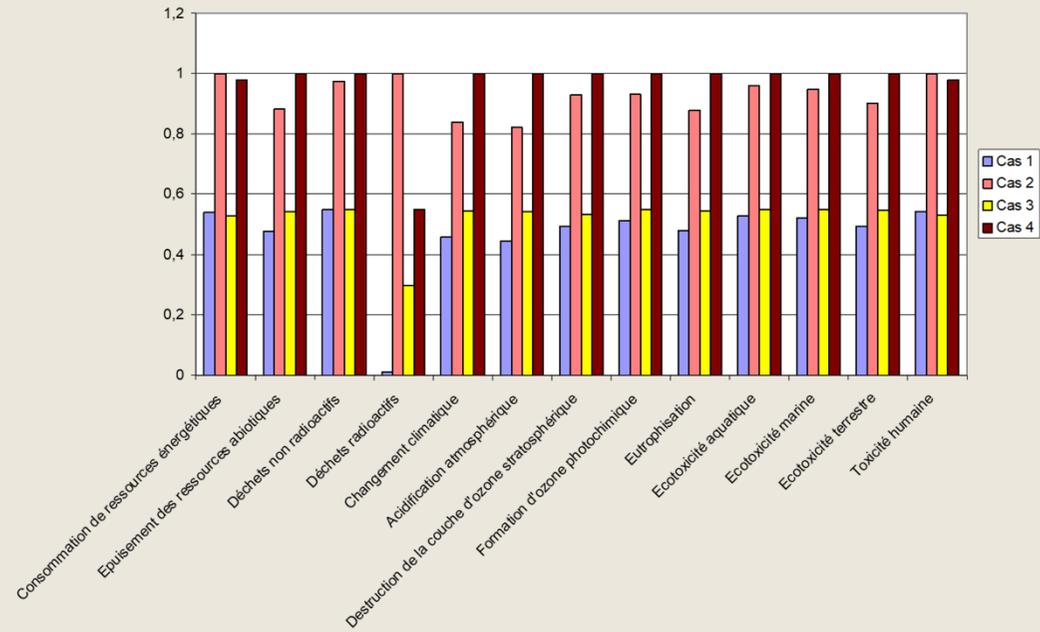
Etape 4

Résultats bruts



Etape 4

Résultats comparatifs



Etape 4

Limites et incertitudes

- Incertitude sur le futur (gestion des déchets en fin de vie, mix électrique)
- Incertitude sur les indicateurs (ex. 35% sur le GWP des gaz autres que le CO₂)

- Limites :

- *Enormément de polluants à comptabiliser pour certains indicateurs*
- *Mesures des rejets parfois difficiles / onéreuses*
- *Indicateurs qui reflètent le niveau de connaissance actuelle*

Ex: Les résidus de médicament dans les eaux usées sont peu voire pas traités (œstrogènes, antidépresseurs...). Bien que dilués, leurs effets sur les écosystèmes et sur l'homme pourraient être significatifs.

⇒ Indicateurs toxicité humaine / écotoxicité à adapter

EXEMPLES D'APPLICATION

Comparaison de deux conceptions d'ouvrage d'art
Construction d'un ouvrage portuaire : écoconception



Pont de Chaldecoste

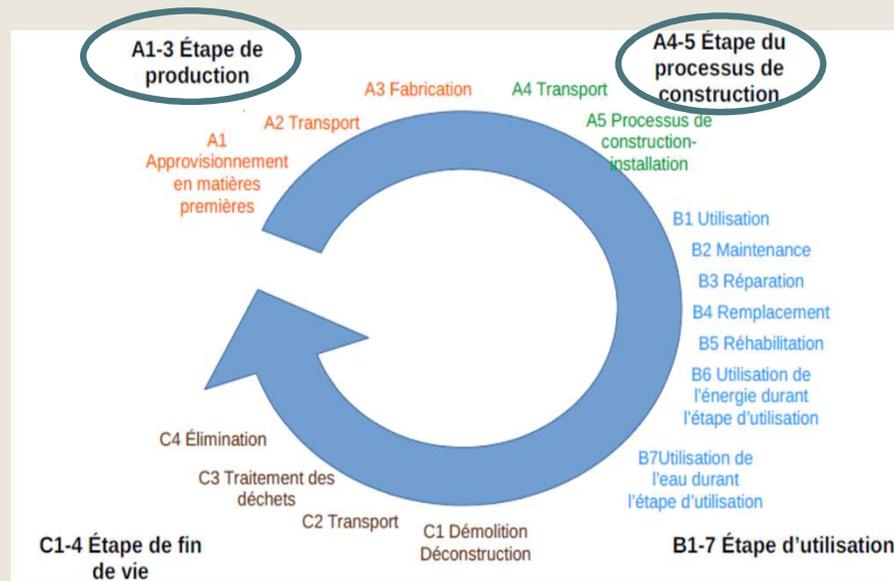
Présentation

- Inspirée de l'étude menée sur le pont de Chaldecoste en Lozère
- Source : « Le pont de Chadelcoste – Un pont vers un développement économique et durable en Lozère » Rapport intermédiaire PEDRA. R. Brière, A.S. Colas, G. Habert, Y. Tardivel
 - *2008 : buse métallique détruite lors d'un épisode cévenol dans la commune de Saint-Andéol de Clerguemort*
 - *Décision du maire de remplacer cette buse par un pont en pierre => valorisation des ressources et du savoir-faire local*



Pont de Chaldecoste

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude



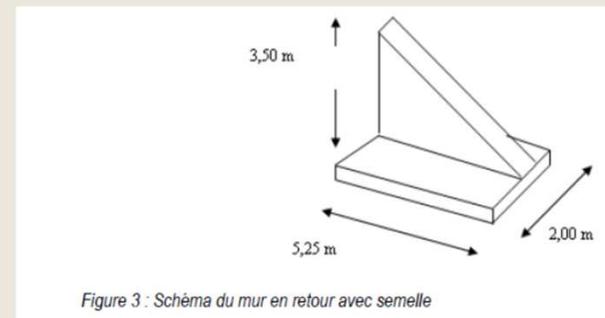
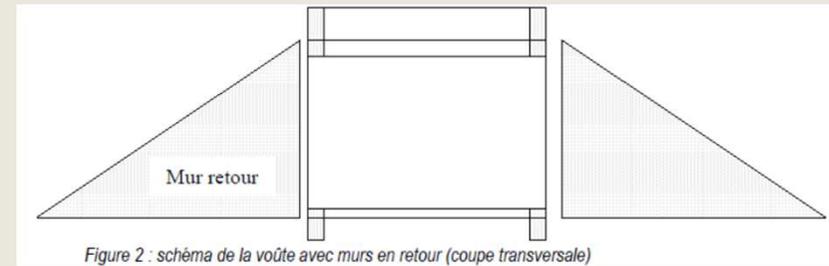
Étapes du cycle de vie d'après la norme NF EN 15804+A1

- **Choix de l'unité fonctionnelle :** « le franchissement d'une rivière pour une route de 4 m 80, en assurant une section hydraulique de 14 m² pendant une durée de 100 ans »
- **Contraintes techniques**
 - Section hydraulique de 14m²
 - Diamètre intérieur de 6 m
 - Diamètre extérieur de 6,50 m
 - Une hauteur totale de 4 m
 - Une largeur de voûte en section complète de 4,80 m

Pont de Chaldecoste

Présentation des deux solutions étudiées

- Deux solutions possibles
 - *Voûte en pierre*
 - *Voûte préfabriquée en béton avec des murs en retour permettant une voûte peu large*
- Aspect non pris en compte pour la comparaison car identique pour les deux solutions
 - *Construction de la route proprement dite (couche de roulement)*
- Données d'inventaire récoltées et classées par module :
 - *Production des matériaux*
 - *Transport : matériaux, personnels, engins*
 - *Construction : utilisation des engins et des différents outils*



Pont de Chaldecoste

2. ICV du pont en pierre

Fonction	Nature	Valeurs
Pierres et mortier	Pierres	389 t
	Chaux	16,13 t
	Sable	112 t
	Ciment	1,4 t
Remplissage	GNT (0/20)	136,2 t
	Chaux (5%)	4,2 t
	Géomembrane (Bitume)	301 kg
	Drain (PVC)	30,8 kg
Ouvrages provisoires (cintre)	Bois (charpente)	1,162 m ³
	Bois (coffrage)	0,515 m ³
	Boulons (Acier)	10 kg
	Rondelles (Acier)	2 kg

Données sur les matériaux

Fonction	Nature	Valeurs
Transport matériaux	Pierre	37 703 t.km
	Mortier	48 763 t.km
	Remplissage	13 582 t.km
	Ouvrages provisoires	190 t.km
Personnel	Voiture	4 800 km
	Utilitaire	9 600 km
Transport des engins	Préparation du chantier	1 467 t.km
	Engins pour le chantier	273 t.km

Données sur le transport

Fonction	Nature	Valeurs	Hypothèses
Terrassement	Fioul	650 L	Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j
	PVC	106 kg	20 mln PVC 60 cm 4mm masse volumique 1,4. Réutilisé une fois sur un autre chantier
Voûte en pierre	Fioul	350 L	Mesure Artisans
	Essence	200 L	Mesure Artisans
	Huile	5 L	Mesure Artisans
	Disques diamants	2,21 kg	7 disques 30cm diam + 3mm épais + 7850 density / 1,5cm extérieur recouvert de poudre de diamant
Remblais	Fioul	320 L	Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 2j

Données sur la construction

Pont de Chaldecoste

2. ICV du pont en béton - Formules des bétons

- Béton de propreté (kg/m³)
 - *Ciment* : 260 kg
 - *Graviers* : 980 kg
 - *Sable* : 890 kg
 - *Eau* : 260 kg
- Béton pour la voûte préfabriquée (kg/m³)
 - *Ciment* : 400 kg
 - *Gravier* : 950 kg
 - *Sable* : 800 kg
 - *Eau* : 197 kg
 - *Superplastifiant* : 5 kg

Pont de Chaldecoste

2. ICV du pont en Béton

Usage	Matériaux	Quantité
Béton de propreté (8,37 m ³)	Ciment	2,18 t
	Granulats	8,2 t
	Sable	7,45 t
Béton préfabriqué (38,91 m ³) *	Ciment	15,56 t
	Granulats	39,96 t
	Sable	31,13 t
	Adjuvant	0,19 t
	Acier de ferrailage	Min: 2 490 kg Moy: 3 112 kg Max: 3 735 kg
Remplissage	GNT **	653,4 t
	Chaux (5%)	21 t
	Géomembrane (bitume)	320 kg
	Drain (PVC)	30,8 kg

Données sur les matériaux

** GNT comprend la Grave non Traitée 0/20 (637 t) qui est mélangée à 5% de chaux + des matériaux drainant (20/40) (1,8 t) + des matériaux pour remblais contigus assimilés à GNT 0/20 (14,6 t)

Usage	Détail	Quantité
Transport matériaux	Béton de propreté	3 462 t.km
	Eléments préfabriqués	11 262 t.km
	Remplissage *	55 875 t.km
Transport personnel chantier	Utilitaire	4 000 km
	Voiture	8 000 km
Transport interne pour l'usine d'éléments préfabriqués	Matériaux constituant le béton	9 841 t.km
	Personnel	871,9 km
Transport engins de chantier	Pelle pour préparation de chantier	1 467 t.km
	Grue pour les éléments préfa	1 467 t.km
	Engins pour le chantier	8 000 t.km

Données sur le transport

Fonction	Nature	Valeurs	Hypothèses
Terrassement	Fioul	800 L	Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j
	PVC	106 kg	20 mln PVC 60 cm 4mm masse volumique 1,4. Réutilisé une fois sur un autre chantier
Béton de propreté	Fioul	135 L	Bétonnière 1L/h 5h/j, 7j + Bobcat 5L/h, 4h/j, 5j
Pose des éléments préfa	Fioul	160 L	Grue 40L/h, 4h de travail
Remblais	Fioul	800 L	Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j

Données sur la construction

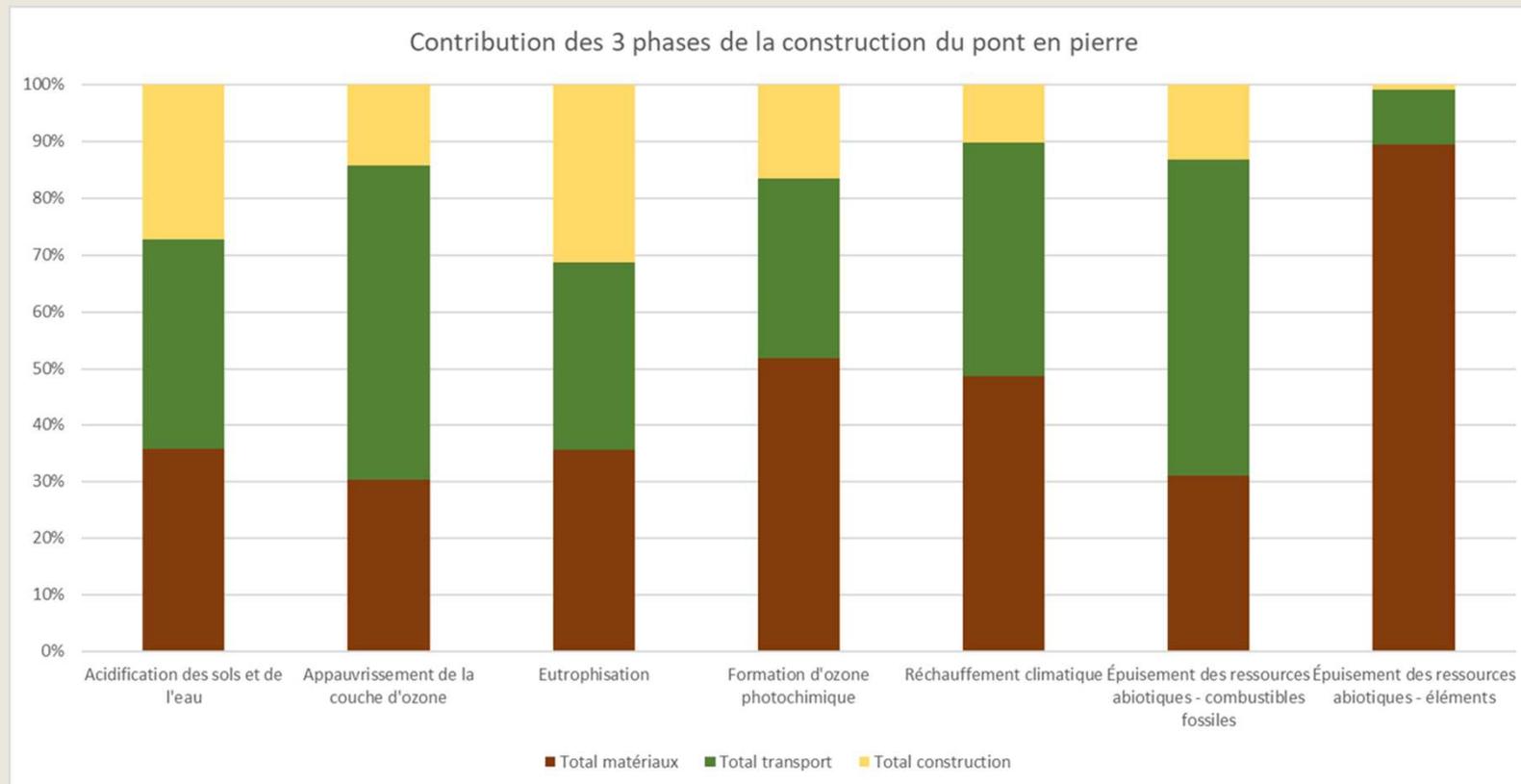
Pont de Chaldecoste

3. Évaluation de l'impact

Indicateurs d'impact	Unité	Description
Réchauffement climatique	kg CO ₂ éq.	Prend en compte les émissions des gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique à un horizon de 100 ans
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq.	Prend en compte toutes les substances qui contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ éq.	Liée à la pollution atmosphérique. L'acidification des sols génère un dépérissement des arbres. L'acidification de l'eau provoque une diminution de la biodiversité et augmente le risque de saturnisme et d'intoxication par l'aluminium
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ éq.	Eutrophisation de l'eau. Introduction de nutriment dans les milieux aquatiques qui conduit à leur modification et à leur dégradation (augmentation de la production d'algues vertes)
Formation d'ozone photochimique	kg éthène éq.	Oxydants photochimiques responsables de la formation d'ozone au niveau de la troposphère (smog de pollution au dessus des villes en période estivale). Les substances à l'origine de cet impact sont le plus souvent les émissions de COV, CO et NOx.
Épuisement des ressources abiotiques (éléments)	kg Sb éq.	Inclut toutes les ressources non renouvelables de matières abiotiques à l'exception des ressources fossiles (ex. : la consommation de minerais)
Épuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)	MJ, pouvoir calorifique inférieur	Inclut toutes les ressources fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole brut)

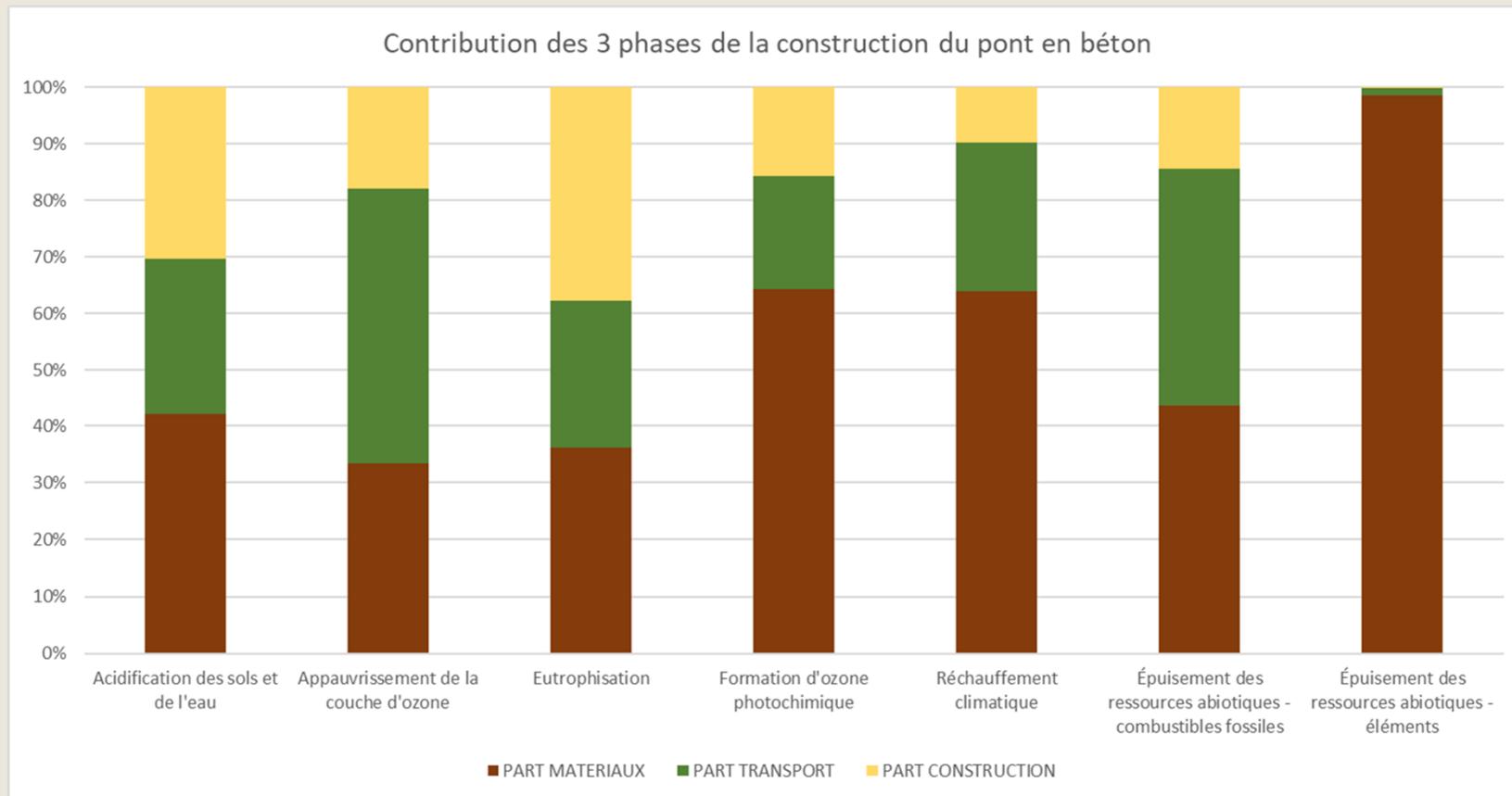
Pont de Chaldecoste

Résultat pour le pont en pierre



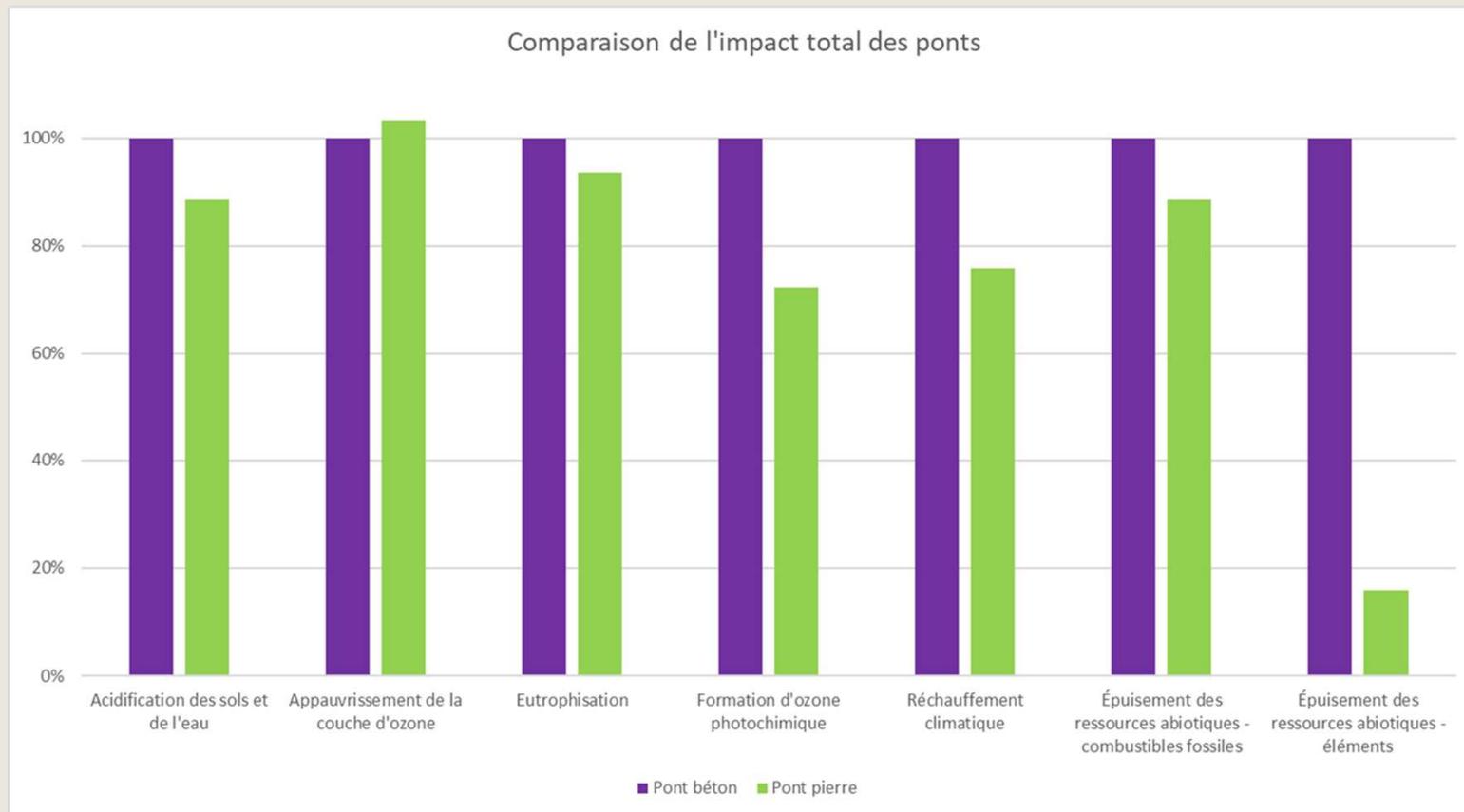
Pont de Chaldecoste

Résultat pour le pont en béton



Pont de Chaldecoste

Comparatif des deux solutions techniques



Terminal à marchandises diverses et conteneurs Avant travaux



Source Ouest-France

TMDC

Objectifs des travaux d'extension

- S'inscrivent dans le cadre des projets d'accueil des grands porte-conteneurs et d'implantation d'un pôle industriel sur Montoir-de-Bretagne.
- Trois objectifs :
 - Accueillir des grands navires porte-conteneurs de 6000 à 8000 EVP (Équivalent Vingt Pieds) ;
 - Disposer des infrastructures nécessaires (quais et terre-pleins) au traitement des trafics attendus ;
 - Disposer de portiques de nouvelle génération en capacité de traiter des grands porte-conteneurs.



TMDC

Présentation des travaux d'extension

- Solution retenue : quai à talus ouvert sur pieux-tubes en acier battus au rocher et remplis de béton, portant un tablier en béton armé, de structure identique à celle des autres postes du terminal à conteneurs.
- Principales caractéristiques :
 - *longueur du front d'accostage : 350m*
 - *largeur du tablier : 52,90m*
 - *niveau du quai : +8,30m CM*
- L'extension prolongera le poste 4 : obtention d'un linéaire de 600m.
- Longueur totale ~1 300m (ajout aux autres postes 1, 2 et 3).



Source Bouygues TP RF

TMDC

Présentation des travaux d'extension



Source GPMNSN



Source Bouygues TP RF

TMDC

Présentation des travaux d'extension



Source Bouygues TP RF



Source Bouygues TP RF

TMDC

Présentation des travaux d'extension



Source NSNP - F. BADAIRE



Source GPMNSN

TMDC

Quelques chiffres

- Sur le chantier
 - *De septembre 2015 à novembre 2017*
 - *Titulaire du marché de travaux : Bouygues Travaux Publics Régions France*
 - *Sous-traitants principaux : Colas, Keller, DTP*

- Sur les matériaux
 - *Bétons (pieux + structure + propreté) : 19 717 m³*
 - *Armatures de structure : 4175 T*
 - *580 pieux de fondation en acier battus => tubes = 6 000T*
 - *Enrobés : 15 220 T*

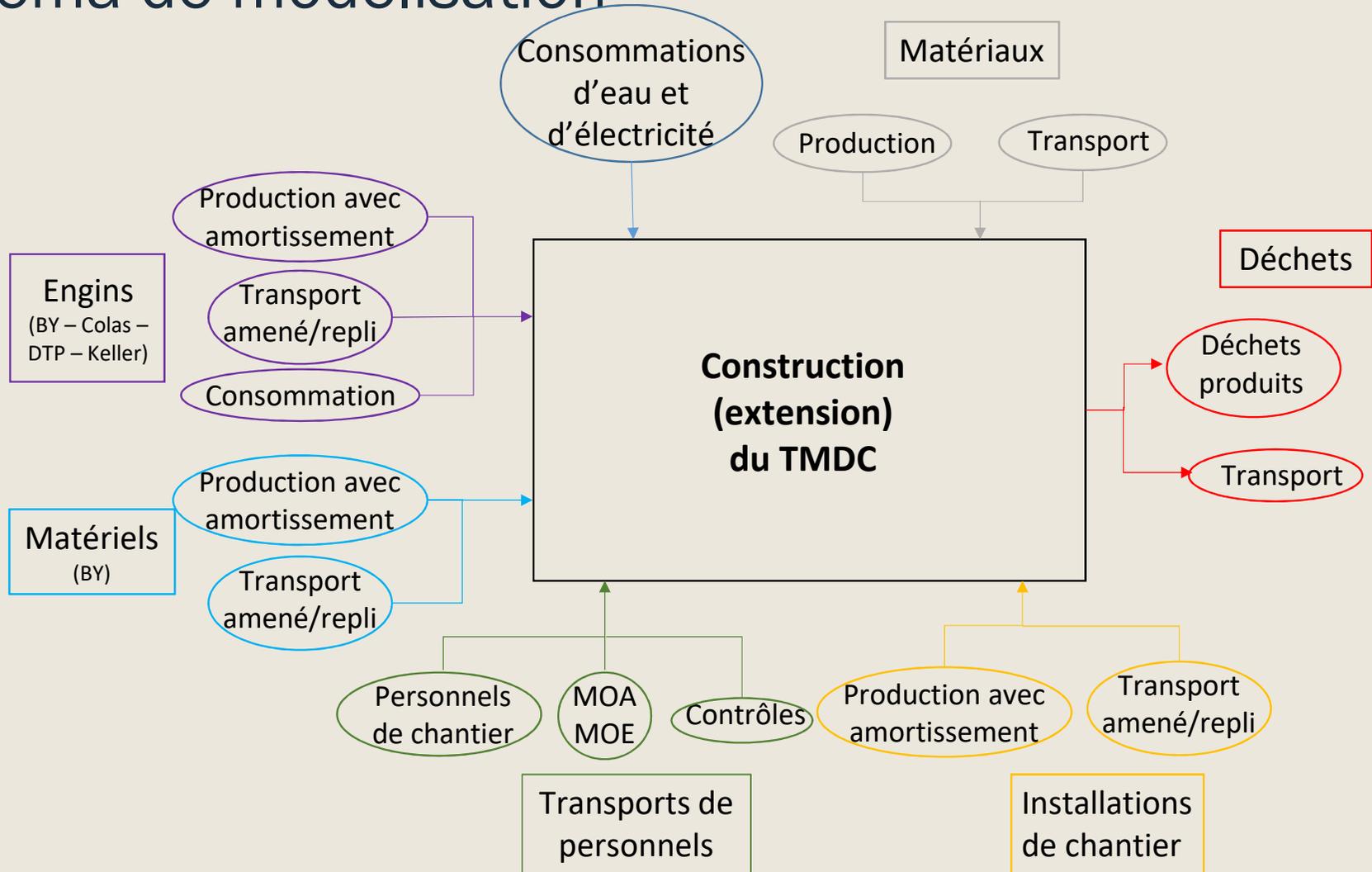
TMDC

Définition des objectifs et du champ de l'étude

- Étude menée suivant la norme NF EN 15804+A1
- Unité déclarée : 1m² de quai
- Flux non pris en compte : report du trafic et département administratif
- Logiciel de calcul : OpenLCA
- Base de données environnementale : Ecoinvent v.3.8
- Récolte des données : au fil des mois par l'entreprise titulaire des travaux

TMDC

Schéma de modélisation



TMDC

2 ICV des travaux

⇒ Affectation de données environnementales aux données des entreprises
ex. pour une partie des matériaux

Donnée à modéliser	Procédé
Béton pieux	Concrete production 35MPa, RNA only - RoW
Béton de structure	Concrete production 50MPa, RNA only - RoW
Béton de propreté	Lean concrete production, with cement CEM II/B - RoW
Armature structure	Reinforcing steel production - RoW
Palplanches	Steel production, low-alloyed, hot rolled - RER
Boucliers d'accostage	Steel production, low-alloyed, hot rolled - RER
Défenses intermédiaires	Steel production, low-alloyed, hot rolled - RER
Tubes provenant de Chine	Steel production, low-alloyed, hot rolled - RoW
Matériaux granulaires Graves 0/200	Gravel production, crushed - RoW
Enrochement 300/1000kg	Gravel production, crushed - RoW
Tube PEHD Annele D1200	Polyethylene production, high density, granulate - RER
Tube PEHD Annele D1000	Polyethylene production, high density, granulate - RER
Béton inclusions rigides	Concrete production 35MPa - RoW
Émulsion	Bitumen adhesive compound production, cold - RER
Béton C30/37 (Air marin)	Concrete production 35MPa - RoW
Béton de tranchée	Concrete production 35MPa - RoW
Béton de structure C40/50	Concrete production 50MPa - RoW
GNT B 0/31,5mm	Gravel production, crushed - RoW
Gravillon d'assainissement	Gravel production, crushed - RoW
Enrobé 44 - Colbase S 0/14 R20	Mastic asphalt production - RoW

Prise en compte des spécificités des matériaux, quand possible

Provenance géographique

Parfois pas de distinction possible (ici sur la taille des granulats)

TMDC

3. Contribution de la construction du quai aux flux de la norme

Indicateurs de flux sortants	Unité	1 m ² de quai
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	1 905
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	0
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ	1 905
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	41 114
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	0
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ	41 114
Utilisation de matière secondaire	kg	-
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ	-
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ	-
Utilisation nette d'eau douce	m ³	3,27
Déchets dangereux éliminés	kg	418
Déchets non dangereux éliminés	kg	2 270
Déchets radioactifs éliminés	kg	0,17
Composants destinés à la réutilisation	kg	-
Matériaux destinés au recyclage	kg	-
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg	-
Énergie fournie à l'extérieur	MJ	-

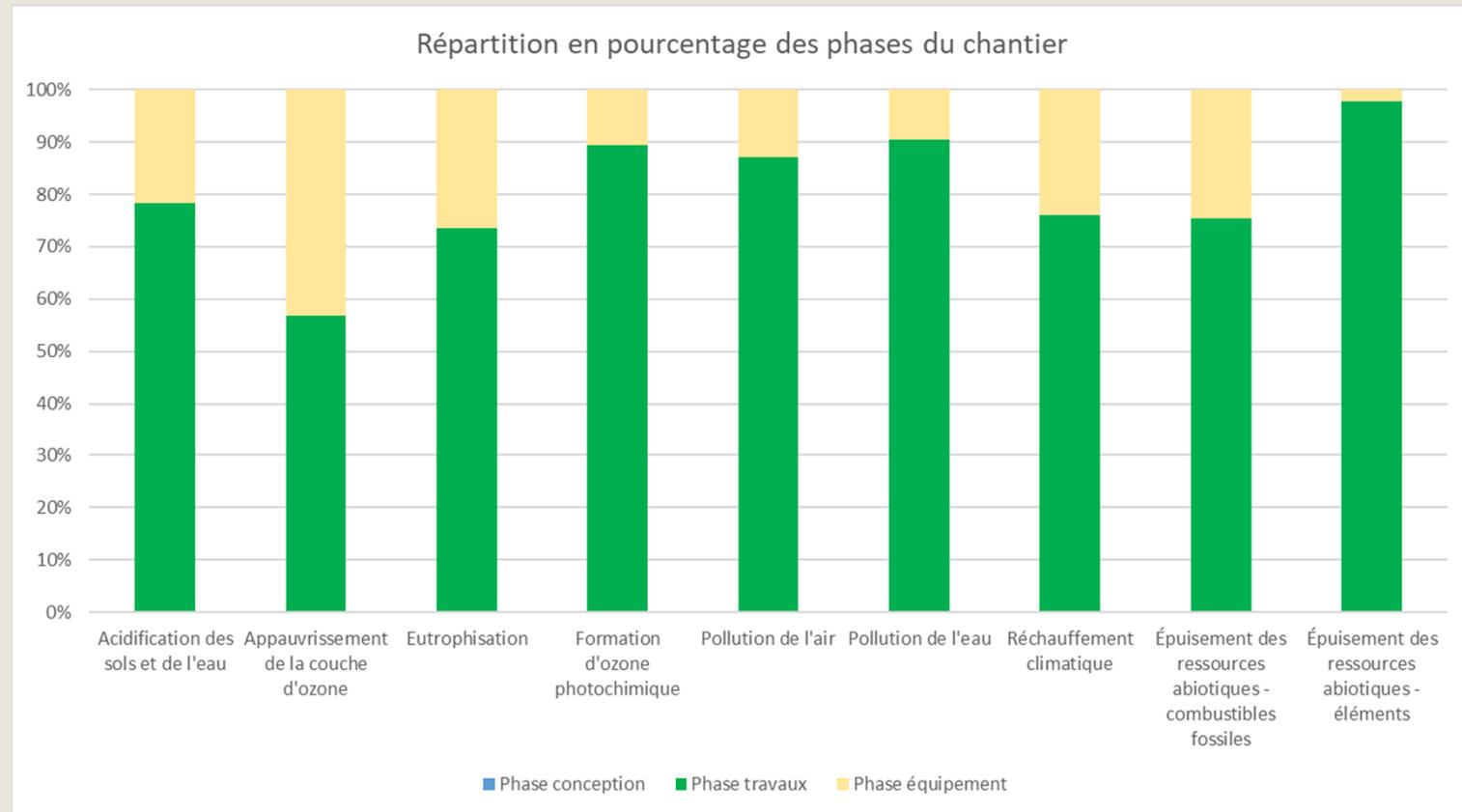
TMDC

3. Contribution de la construction du quai aux cat. d'impacts

Indicateurs d'impact	Unité	1 m ² de quai
Réchauffement climatique	kg CO ₂ équivalent	2 913
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC ⁻¹¹ équivalent	3.10 ⁻⁴
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ équivalent	13
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ équivalent	1,8
Formation d'ozone photochimique	kg éthène équivalent	0,90
Épuisement des ressources abiotiques (éléments)	kg Sb équivalent	11.10 ⁻⁷
Épuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)	MJ, pouvoir calorifique inférieur	4,31.10 ⁴
Pollution de l'air	m ³	6,49.10 ⁵
Pollution de l'eau	m ³	6 986

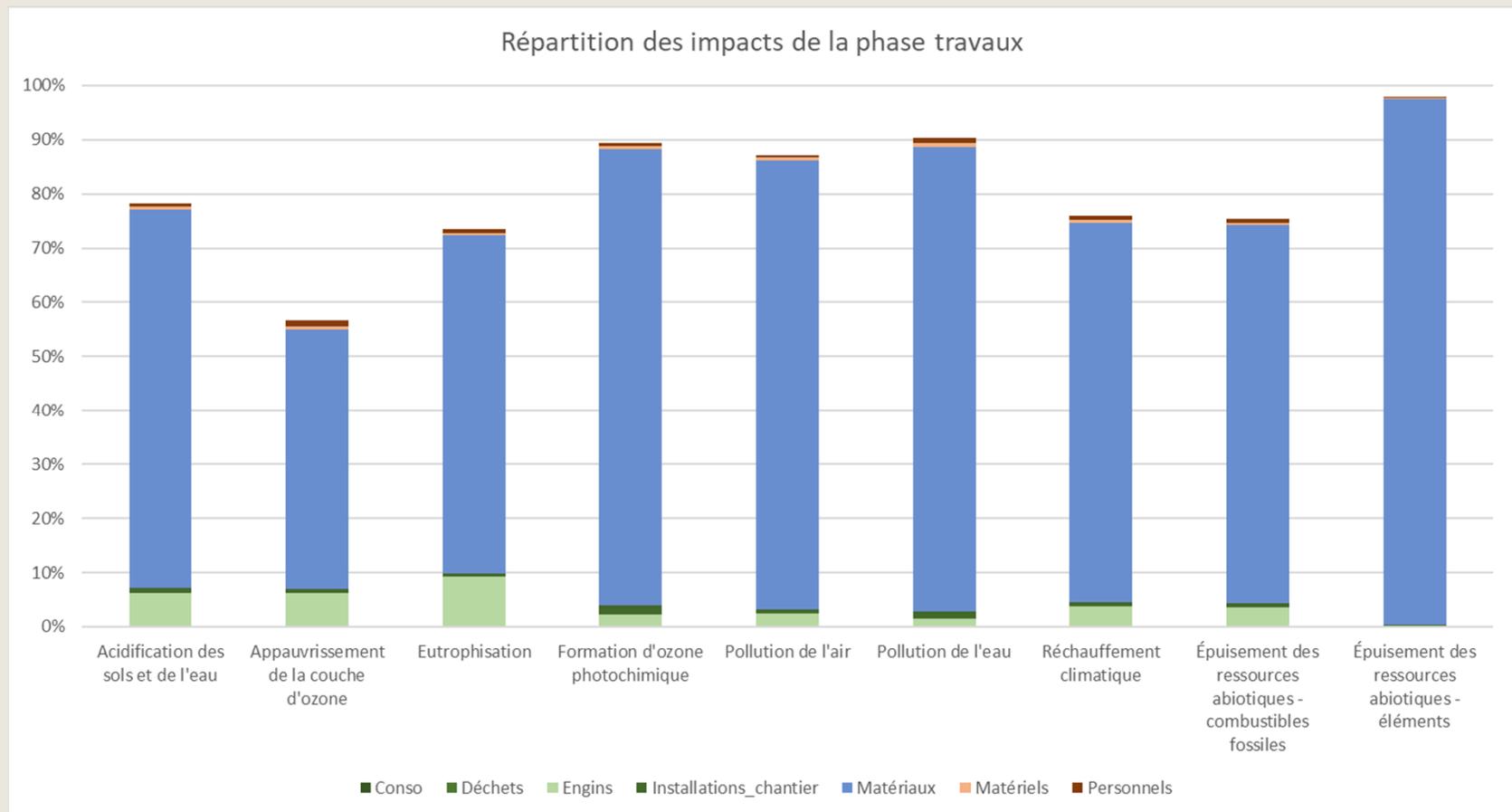
TMDC

4. Interprétation



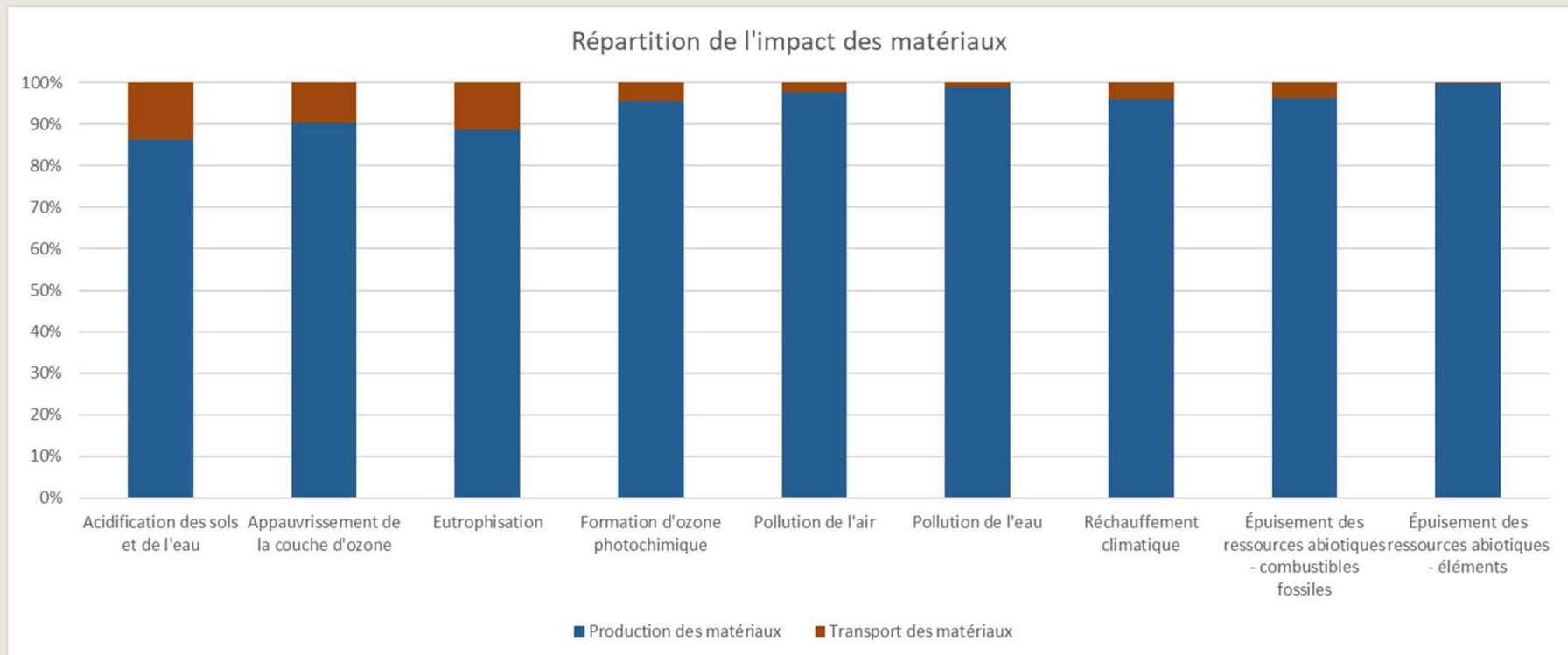
TMDC

4. Interprétation



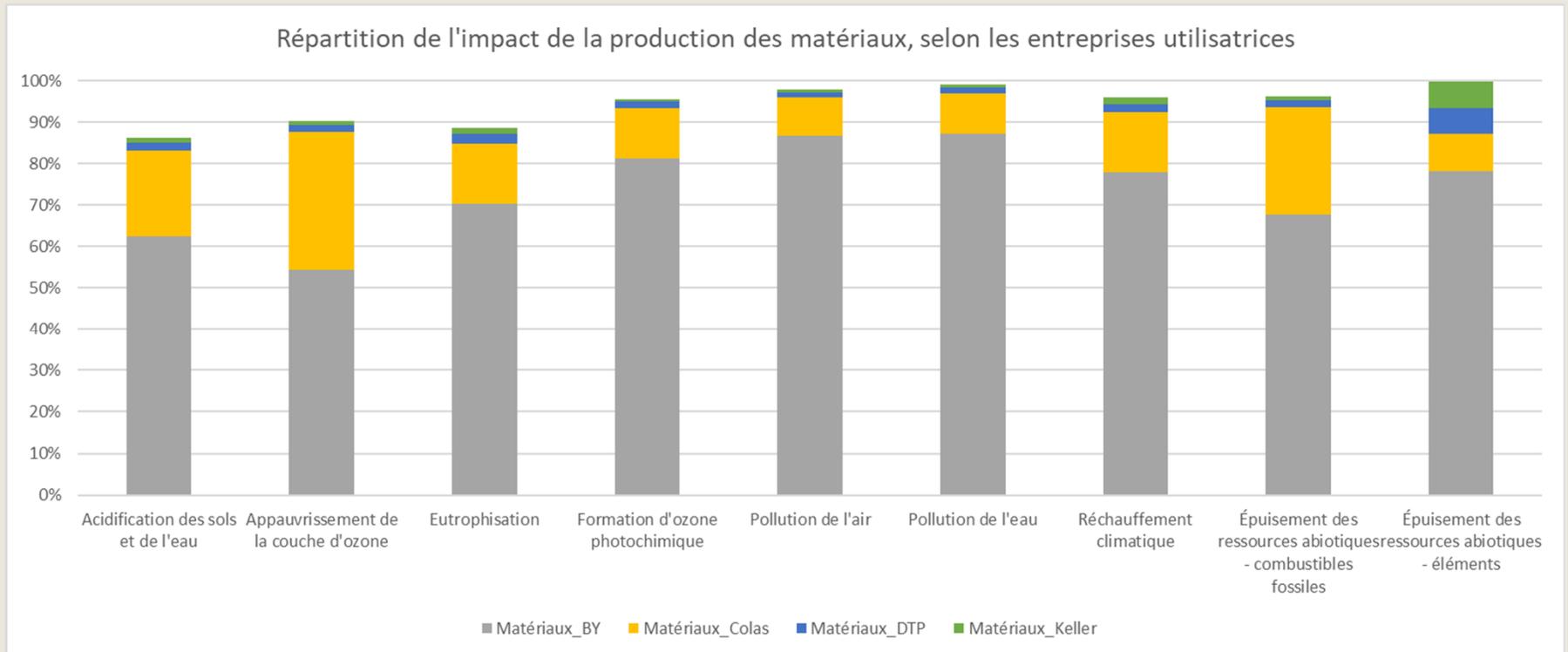
TMDC

4. Interprétation



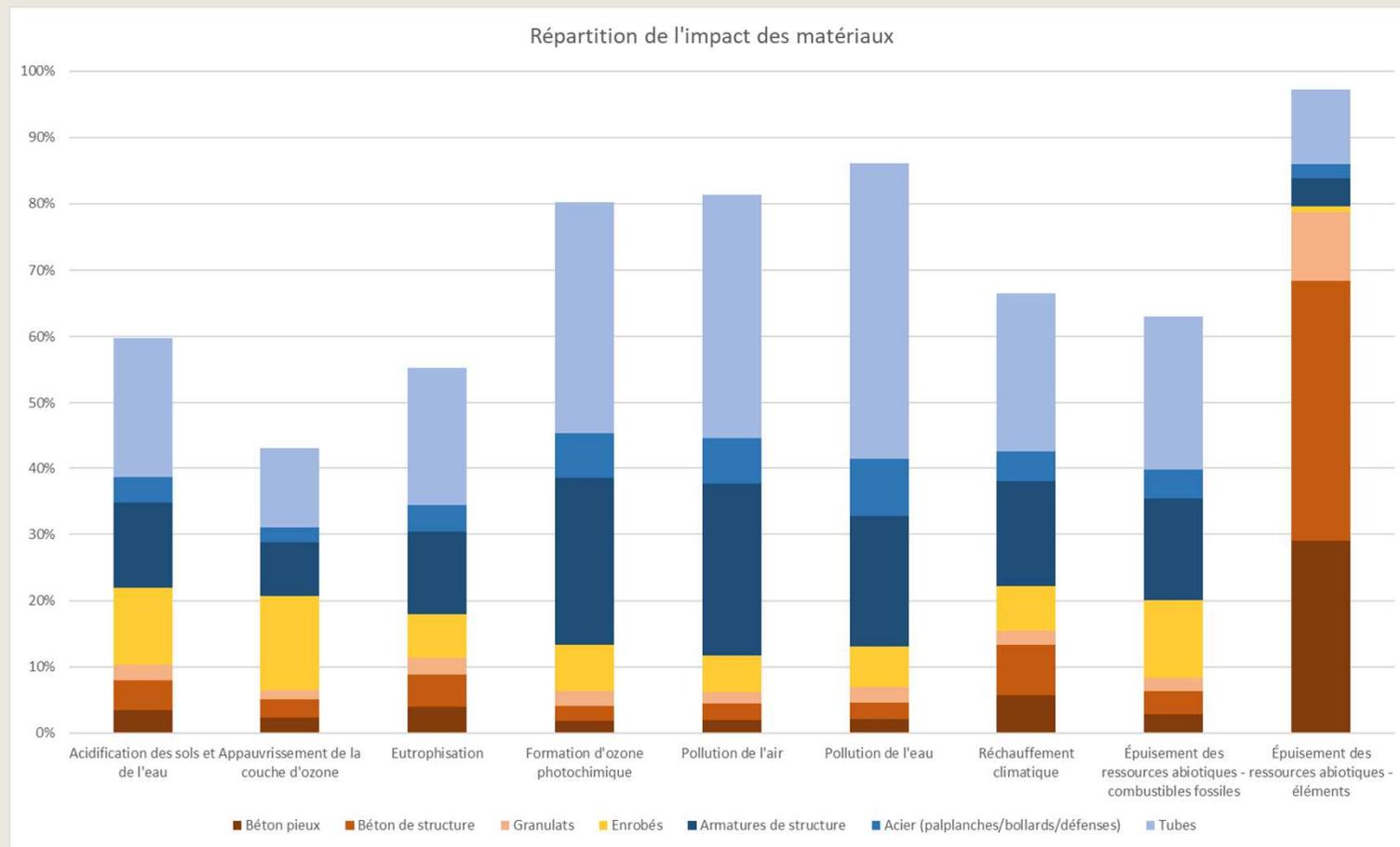
TMDC

4. Interprétation



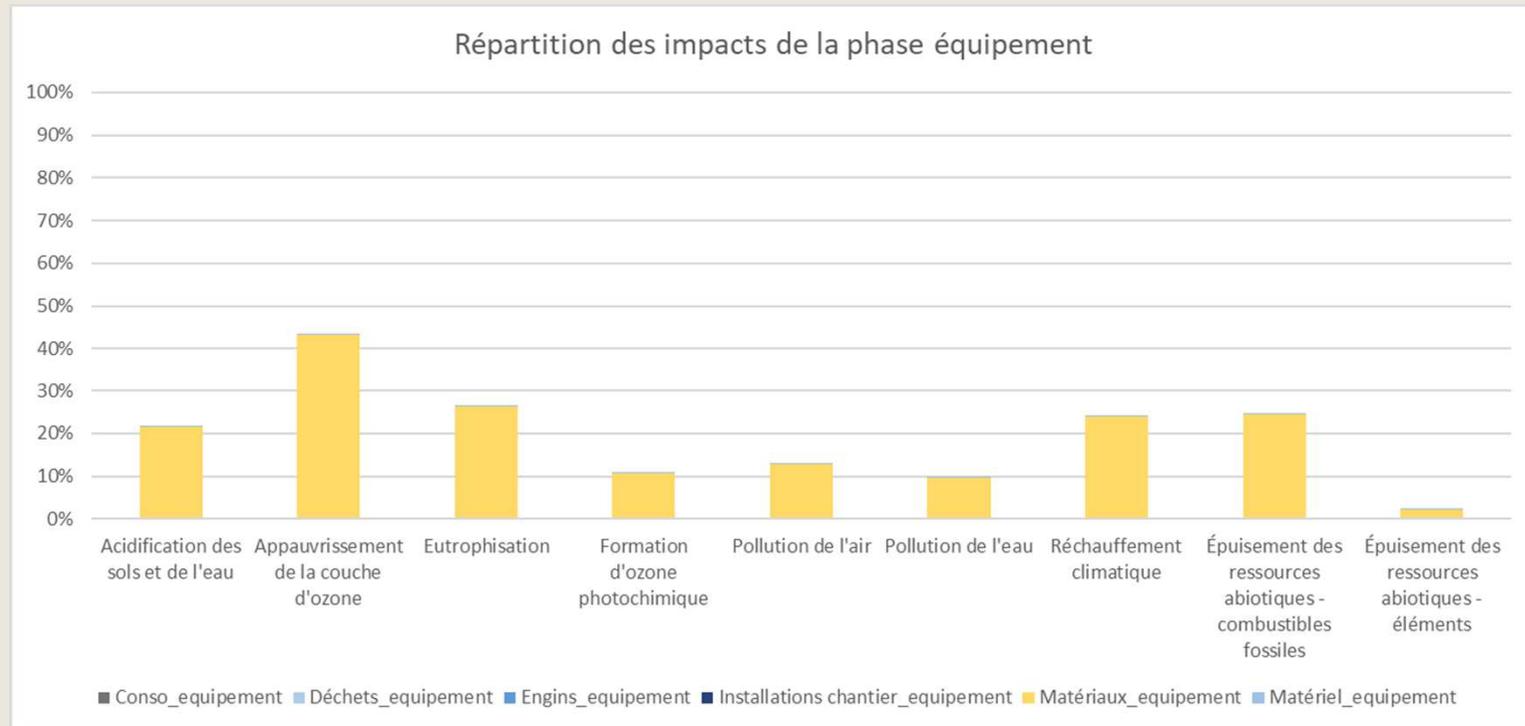
TMDC

4. Interprétation



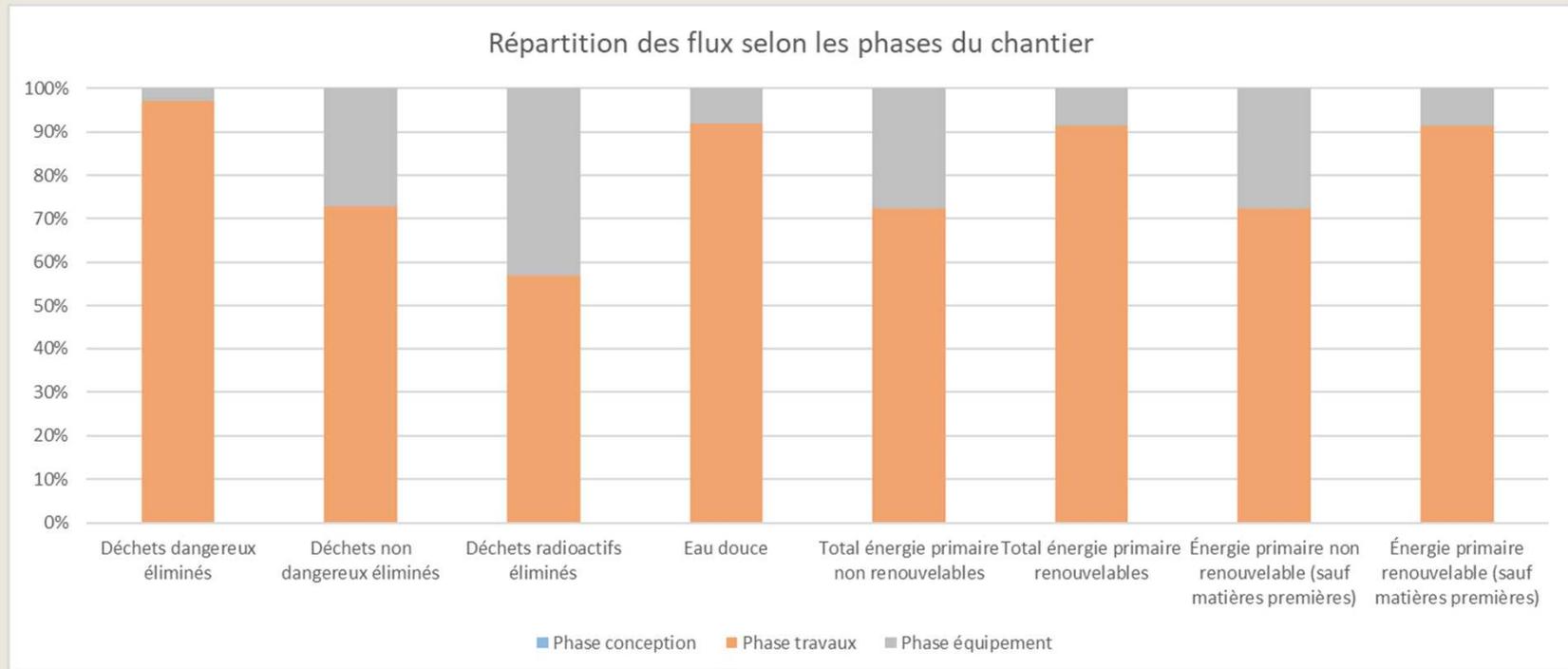
TMDC

4. Interprétation



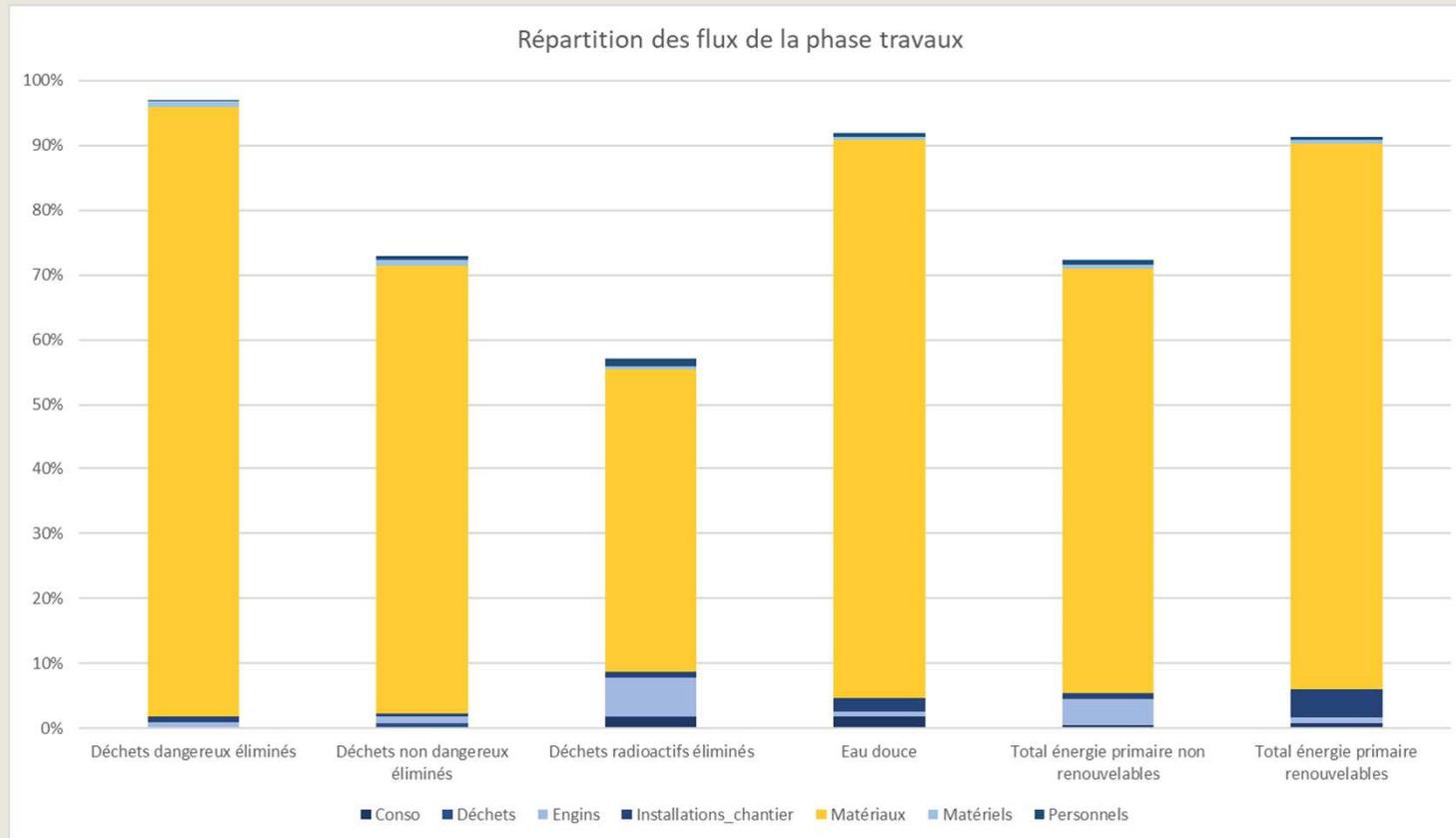
TMDC

4. Interprétation



TMDC

4. Interprétation



TMDC

4. Interprétation

- Quelles autres exploitations effectuer ?
- Quelles propositions de leviers d'éco-conception pour un futur chantier ?