



## **ANF Fab3D métallique**

**Procédés de dépôts plasma et laser par fil fondu  
pour l'impression métallique 3D (WAAM et WLAM)**

**Bourges, 24-25-26 novembre 2025**

# **Durabilité du procédé : Analyse de cycle de vie et impact environnemental du WAAM**

**Antoine Balidas – [antoine.balidas@ens-rennes.fr](mailto:antoine.balidas@ens-rennes.fr)**

## *Analyse de cycle de vie et impact environnemental du WAAM*



**Contexte général**



**Démarche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)**



**Application au WAAM**



**Etude de cas et comparaison à la fonderie**



**Perspectives**

## Projet GreenDfAM

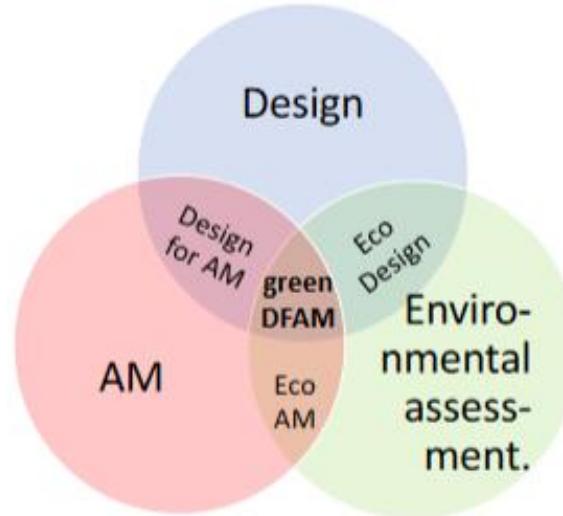


Antoine Balidas – Doctorant 3<sup>ème</sup> année

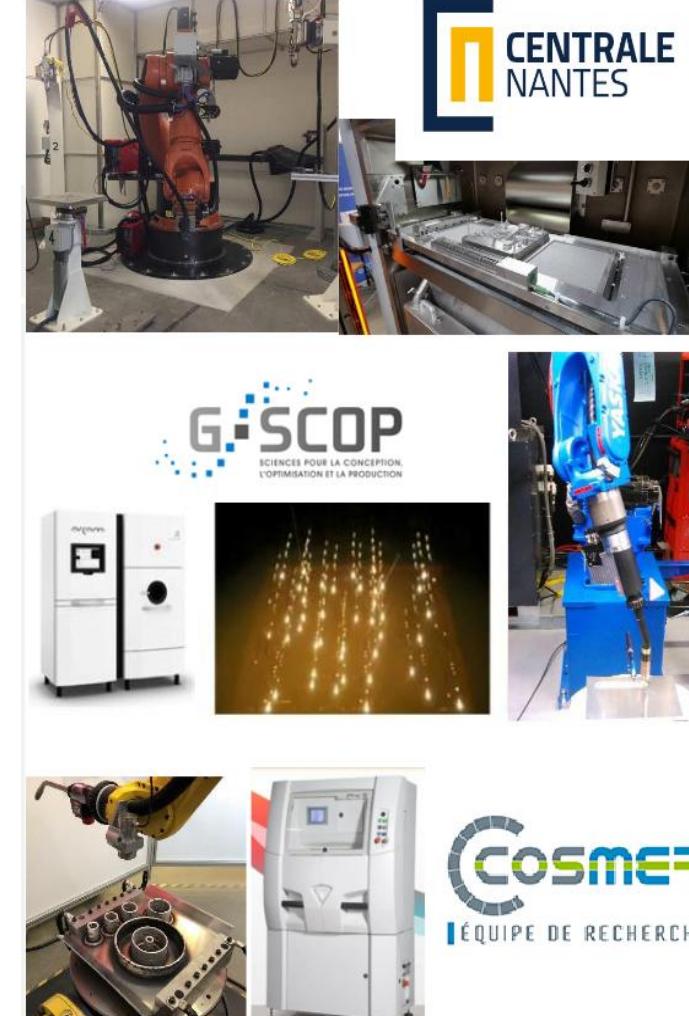
Encadrement : Olivier Kerbrat (ENS Rennes, IPR) et  
Matthieu Rauch (Centrale Nantes, GeM)

### Objectifs du projet :

- Etudier l'impact environnemental de la FA (WAAM)
- Comparer les performances environnementales de la FA à celles de procédés traditionnels sur des cas d'étude industriels (Fonderie)
- Identifier les potentiels de fortes réductions d'impact grâce à la FA
- Proposer un outil d'aide à la décision pour les concepteurs afin de réduire l'impact des pièces conçues/produites



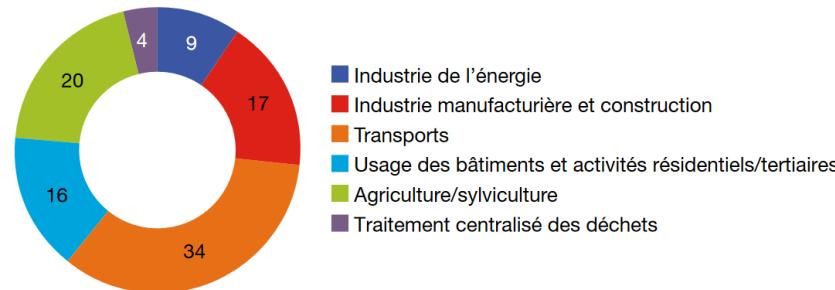
### Partenaires académiques



## Place de l'industrie dans le développement durable

RÉPARTITION SECTORIELLE DES ÉMISSIONS DE GES EN FRANCE EN 2023  
(ESTIMATION PROVISOIRE)

En %



Note : les données 2023 sont une estimation préliminaire.

Source : Format Secten – Citepa, 2024

La métallurgie fait partie des 4 activités les plus émettrices dans le secteur manufacturier avec la chimie, la construction et l'agro-alimentaire

Objectif 9 sur l'industrie, l'innovation et les infrastructures sur les 17 objectifs définis par les Nations Unis pour le développement durable



## Contexte normatif – Mise en place de normes et réglementations



Norme ISO 14001 : Cadre à l'échelle internationale pour respecter des critères, mettre en place des démarches et améliorer les performances environnementales



INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
14955-1

Second edition  
2017-11

Machine tools — Environmental evaluation of machine tools —

Part 1:  
Design methodology for energy-efficient machine tools

Machines-outils — Évaluation environnementale des machines-outils —  
Partie 1: Méthode de conception pour l'efficacité énergétique des machines-outils



Responsabilité  
sociétale des  
entreprises



*Registration,  
Evaluation,  
Authorization and  
restriction of  
Chemicals*



- Limite le
- Plomb
  - Mercure
  - Cadmium
  - Chrome hexavalent
  - Polybromobiphényles
  - Polybromodiphényléthers

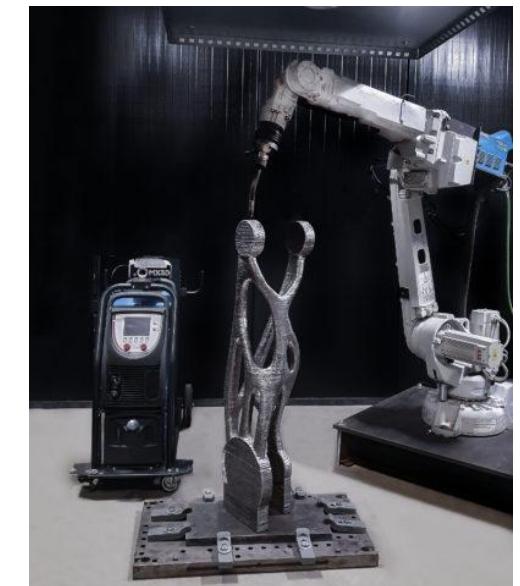
## Le procédé WAAM

Spécificités et avantages de production :

- **Productivité** : Taux de dépôt important (2 – 10 kg/h)
  - **Espace de travail** : Grande zone d'action du robot
  - **Complexité géométrique** : Contrôle de la direction de fabrication et grande mobilité
- ⇒ Adapté à la fabrication de pièces de grandes dimensions

⇒ Intérêt du WAAM d'un point de vue environnemental pour la production de pièces de grandes dimensions en comparaison avec des procédés traditionnels

*Exemples de réalisations WAAM (MX3D) :*



## Base normative – Product Environmental Footprint (PEF)



Projet de l'Union européenne de développement d'une méthode d'évaluation de l'impact environnemental global d'un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie.

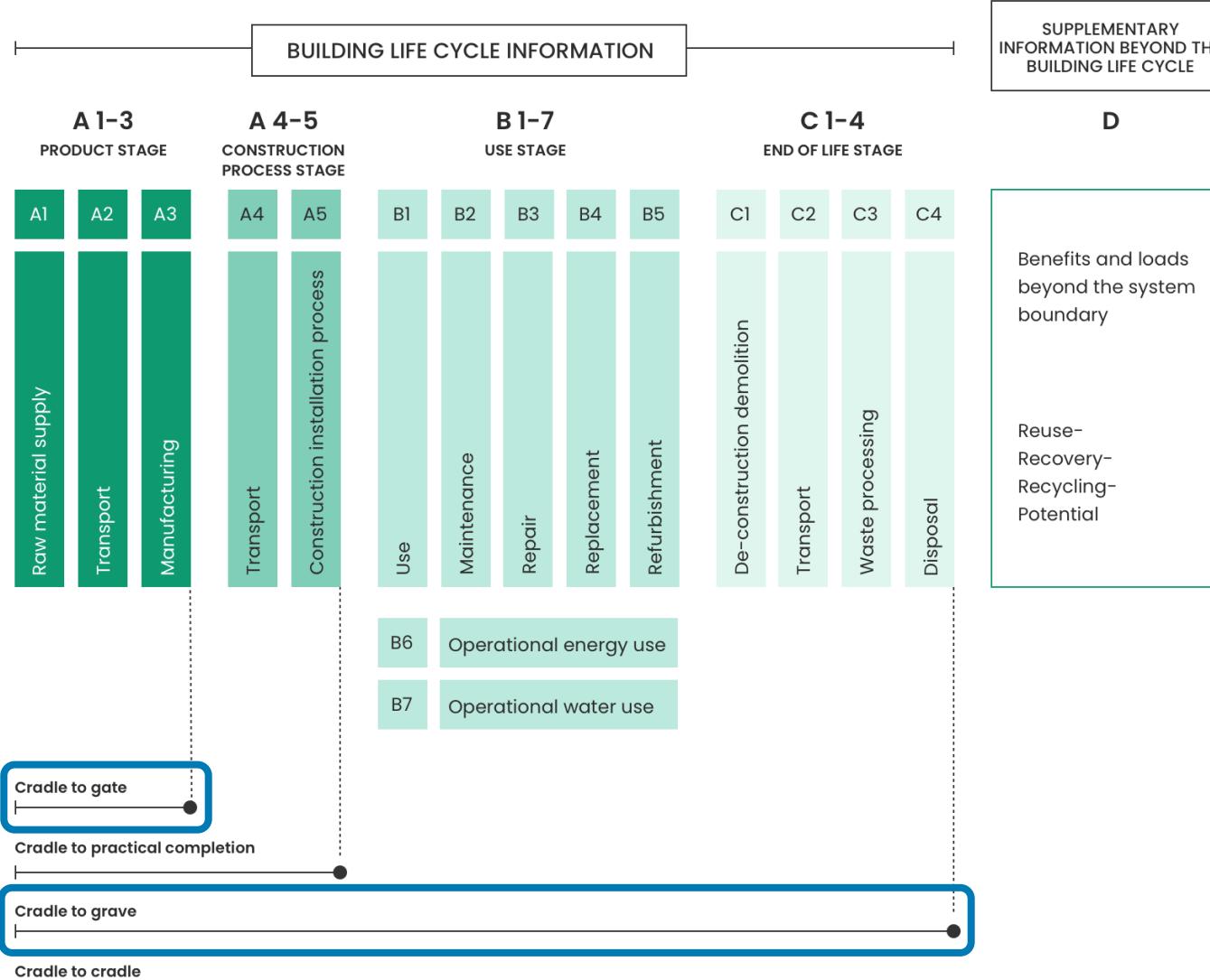
Harmonisation des méthodes existantes et création de la méthode EF (dernière version, EF 3.1 juillet 2022)

## Cycle de vie complet d'un produit



*Cycle de vie produit, méthode Product Environmental Footprint (PEF) de la Commission Européenne*

## Application au secteur du bâtiment et périmètres d'étude



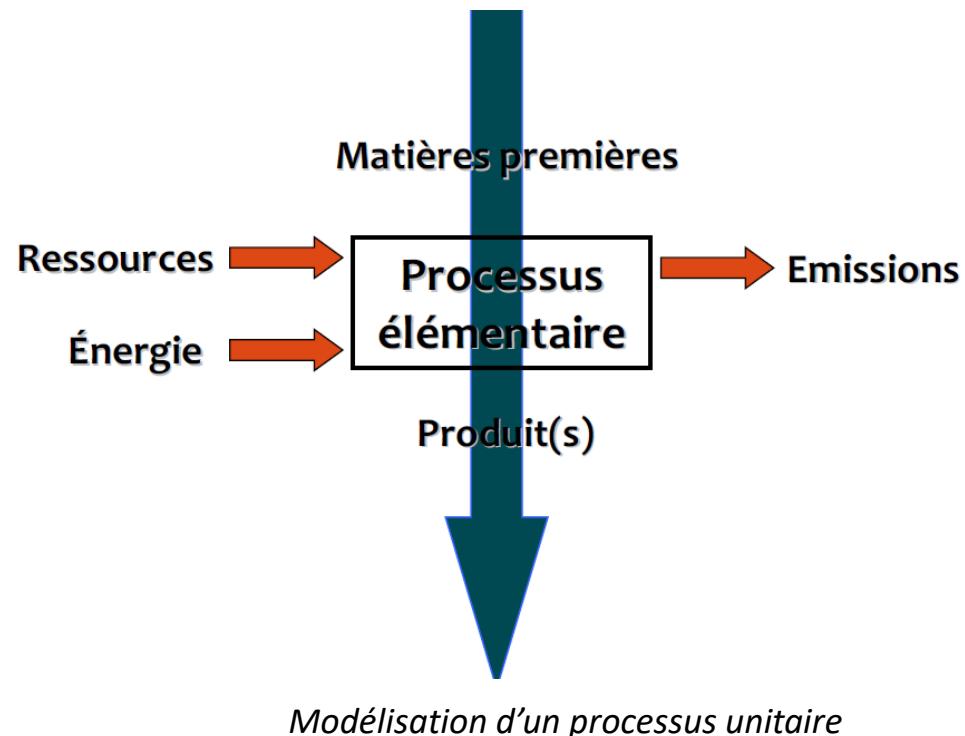
Périmètres d'étude les plus courants :

- Cradle to grave : Cycle complet
- Cradle to gate : De l'extraction des matières première jusqu'à la fin de la fabrication
- Gate to gate : Focus sur la phase de fabrication ou sur une étape précise

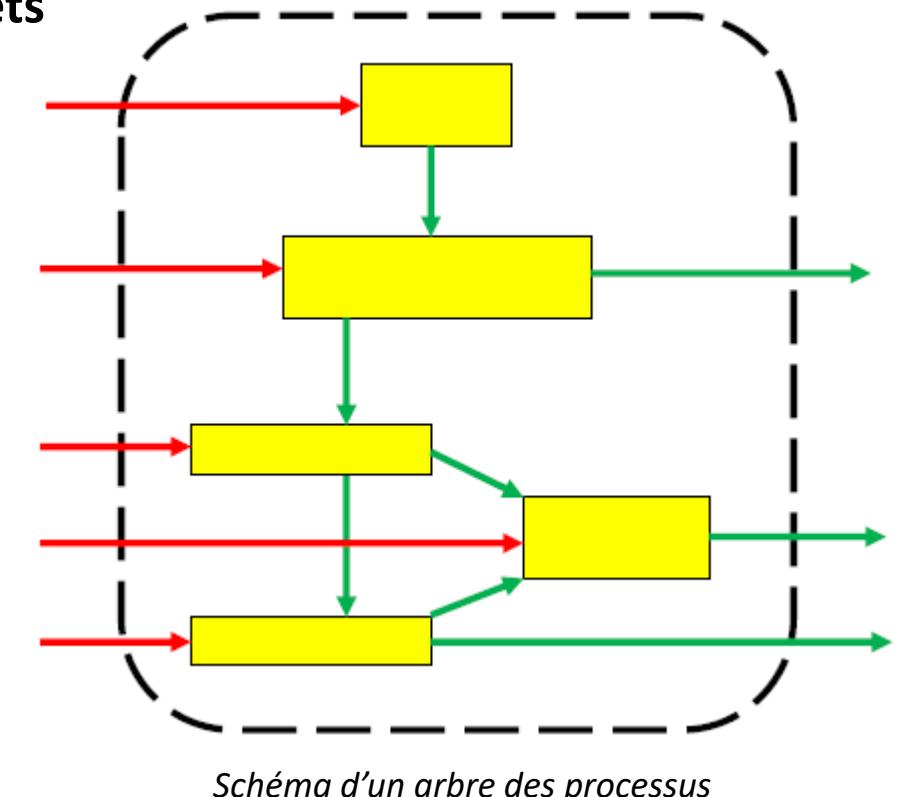
## Etape d'un cycle de vie et arbre des processus

Représentation du **cycle de vie** d'un produit sous forme de **processus unitaires** formant un **arbre des processus**

On associe à chaque processus des **consommations** et des **rejets**



Air  
Eau  
Sol



## Inventaire de flux et obtention des données

Les résultats d'une ACV dépendent des **données d'inventaire** recueillies

Différentes sources possibles de données :

- Base de données (ex : Ecoinvent)
- Littérature
- Industriel
- Relevés expérimentaux

## Calcul de l'impact environnemental à partir de l'inventaire – Catégories d'impact

La méthode EF 3.1 définit **16 catégories d'impact** détaillant l'impact environnemental d'un produit  
 Un **indicateur (EF)** est également défini, permettant d'agréger ces catégories

Impact category		Impact category Indicator (unit of measure)	Description
	Climate change, total	Radiative forcing as global warming potential – GWP100 (kg CO <sub>2</sub> eq)	Increase in the average global temperature resulting from greenhouse gas emissions (GHG)
	Ozone depletion	Ozone Depletion Potential – ODP (kg CFC-11 eq)	Depletion of the stratospheric ozone layer protecting from hazardous ultraviolet radiation
	Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	Impact on human health caused by absorbing substances through the air, water, and soil. Direct effects of products on humans are not measured
	Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	

	Particulate matter	Impact on human health (disease incidence)	Impact on human health caused by particulate matter emissions and its precursors (e.g. sulfur and nitrogen oxides)
	Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U-235 (kBq U-235 eq)	Impact of exposure to ionising radiations on human health
	Photochemical ozone formation, human health	Tropospheric ozone concentration increase (kg NMVOC eq)	Potential of harmful tropospheric ozone formation ("summer smog") from air emissions
	Acidification	Accumulated Exceedance – AE (mol H <sup>+</sup> eq)	Acidification from air, water, and soil emissions (primarily sulfur compounds) mainly due to combustion processes in electricity generation, heating, and transport

## Calcul de l'impact environnemental à partir de l'inventaire – Catégories d'impact

La méthode EF 3.1 définit **16 catégories d'impact** détaillant l'impact environnemental d'un produit  
 Un **indicateur (EF)** est également défini, permettant d'agréger ces catégories

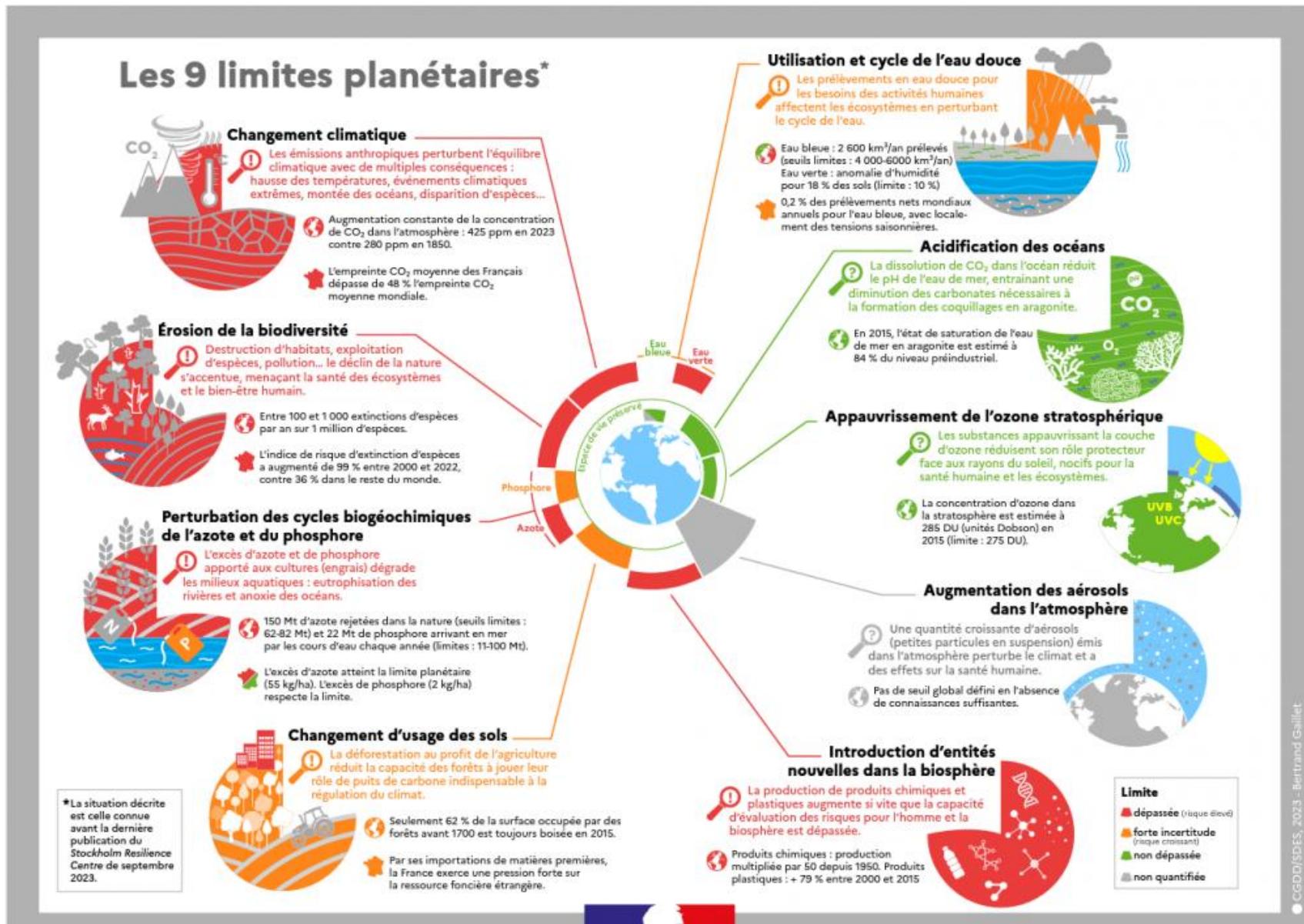
	Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance – AE (mol N eq)	Eutrophication and potential impact on ecosystems caused by nitrogen and phosphorous emissions mainly due to fertilizers, combustion, sewage systems
	Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (kg P eq)	
	Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (kg N eq)	
	Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	Impact of toxic substances on freshwater ecosystems

	Land use	Soil quality index, representing the aggregated impact of land use on: Biotic production; Erosion resistance; Mechanical filtration; Groundwater replenishment (Dimensionless – pt)	Transformation and use of land for agriculture, roads, housing, mining or other purposes. The impact can include loss of species, organic matter, soil, filtration capacity, permeability
	Water use	Weighted user deprivation potential (m³ world eq)	Depletion of available water depending on local water scarcity and water needs for human activities and ecosystem integrity
	Resource use, minerals and metals	Abiotic resource depletion – ADP ultimate reserves (kg Sb eq)	Depletion of non-renewable resources and deprivation for future generations
	Resource use, fossils	Abiotic resource depletion, fossil fuels – ADP-fossil (MJ)	

## Limites planétaires

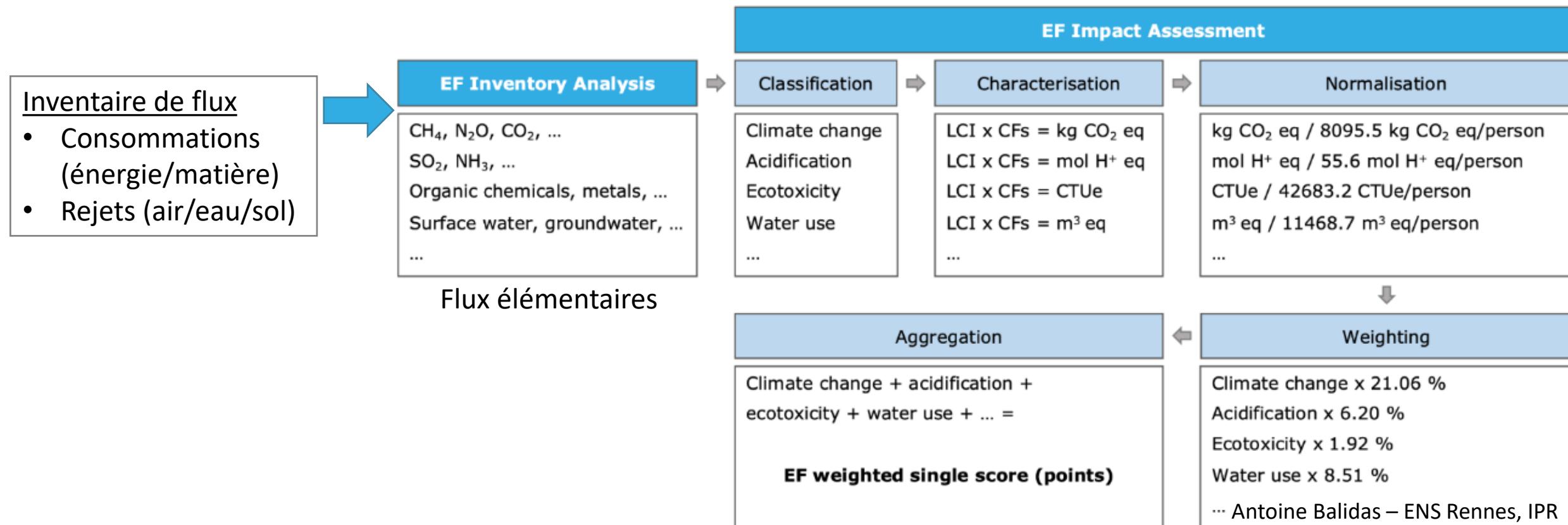
Ces catégories d'impact sont notamment définies en fonction des limites planétaires

Septembre 2025 : 7<sup>ème</sup> limite franchie, l'Acidification des océans



## Calcul de l'impact environnemental à partir de l'inventaire – Méthode de calcul

La méthode EF 3.1 définit **16 catégories d'impact** détaillant l'impact environnemental d'un produit  
 Un **indicateur (EF)** est également défini, permettant d'agréger ces catégories

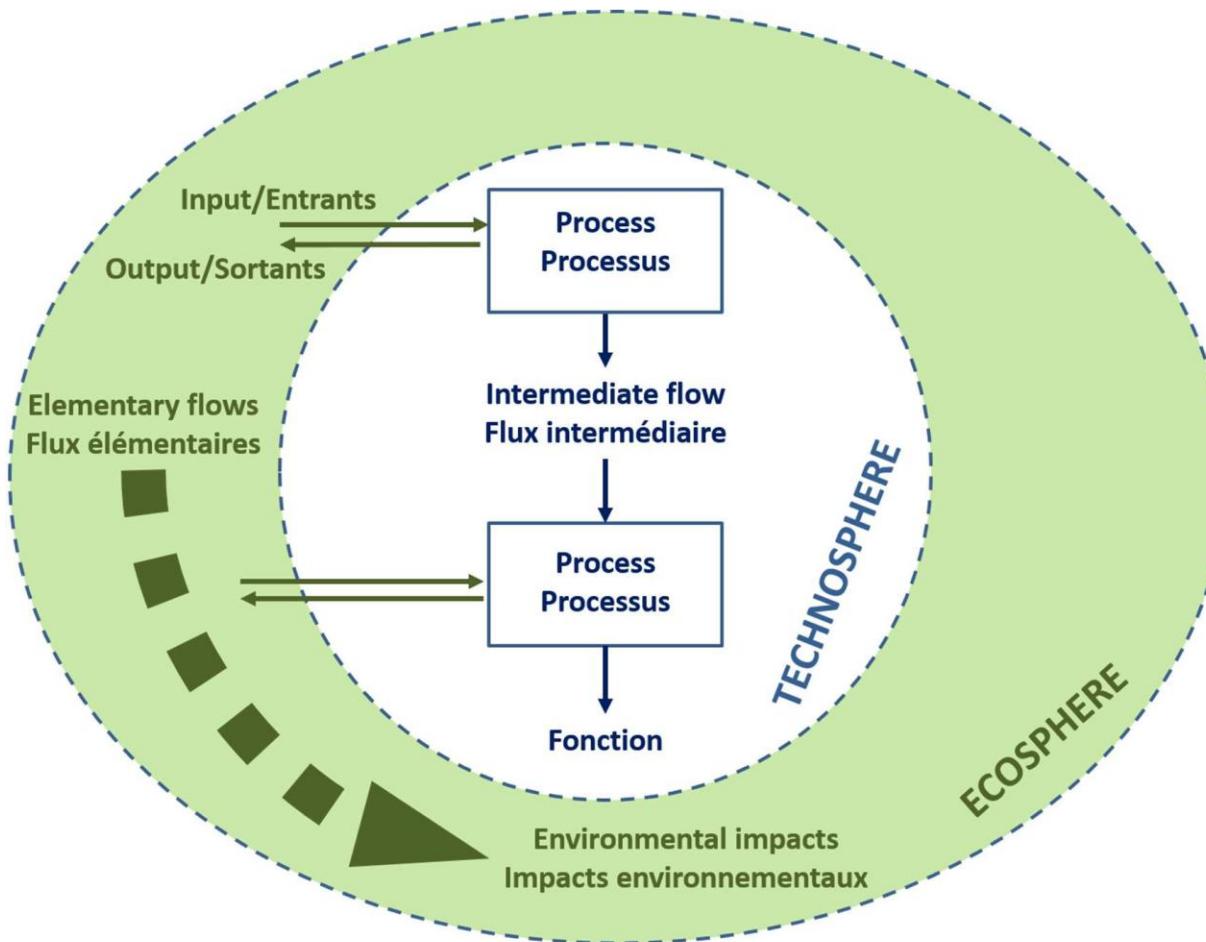


## Calcul de l'impact environnemental à partir de l'inventaire – Méthode de calcul

Exemple pour la catégorie « Changement climatique » des flux élémentaires de leur facteur de conversion en kgCO<sub>2</sub>eq/kg

Flux	Facteur de conversion en kgCO <sub>2</sub> -Eq/kg	Flux	Facteur de conversion en kgCO <sub>2</sub> -Eq/kg	Flux	Facteur de conversion en kgCO <sub>2</sub> -Eq/kg	Flux	Facteur de conversion en kgCO <sub>2</sub> -Eq/kg
Carbon dioxide, fossil	1,0	Ethane, 1-chloro-1,1-difluoro-, HCFC-142b	2350,0	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	2110,0	Methane, tetrafluoro-, R-14	7350,0
Carbon monoxide, fossil	1,57	Ethane, 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoro-, HCFC-123	96,0	Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	15500,0	Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	5350,0
Chloroform	20,0	Ethane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124	635,0	Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	11500,0	Methane, trifluoro-, HFC-23	13900,0
Dinitrogen monoxide	298,0	Ethane, chloropentafluoro-, CFC-115	8520,0	Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	179,0	Methyl acetate	3,0
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	1550,0	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	12300,0	Methane, difluoro-, HFC-32	817,0	Methyl formate	712,0
Ethane, 1,1,1-trifluoro-, HFC-143a	5510,0	Ethane, pentafluoro-, HFC-125	3690,0	Methane, fossil	36,8	Nitrogen fluoride	17900,0
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	6590,0	Methane	36,8	Methane, from soil or biomass stock	36,8	Sulfur hexafluoride	26100,0
Ethane, 1,1-dichloro-1-fluoro-, HCFC-141b	938,0	Methane, biogenic	34,0	Methane, monochloro-, R-40	15,0	VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	4,23
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	167,0	Methane, bromo-, Halon 1001	3,0	Methane, non-fossil	34,0		
Ethane, 1,2-dichloro-	1,0	Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	2070,0	Methane, tetrachloro-, CFC-10	2020,0		
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	9620,0	Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	7150,0	Methane, tetrachloro-, R-10	2020,0	Antoine Balidas – ENS Rennes, IPR	

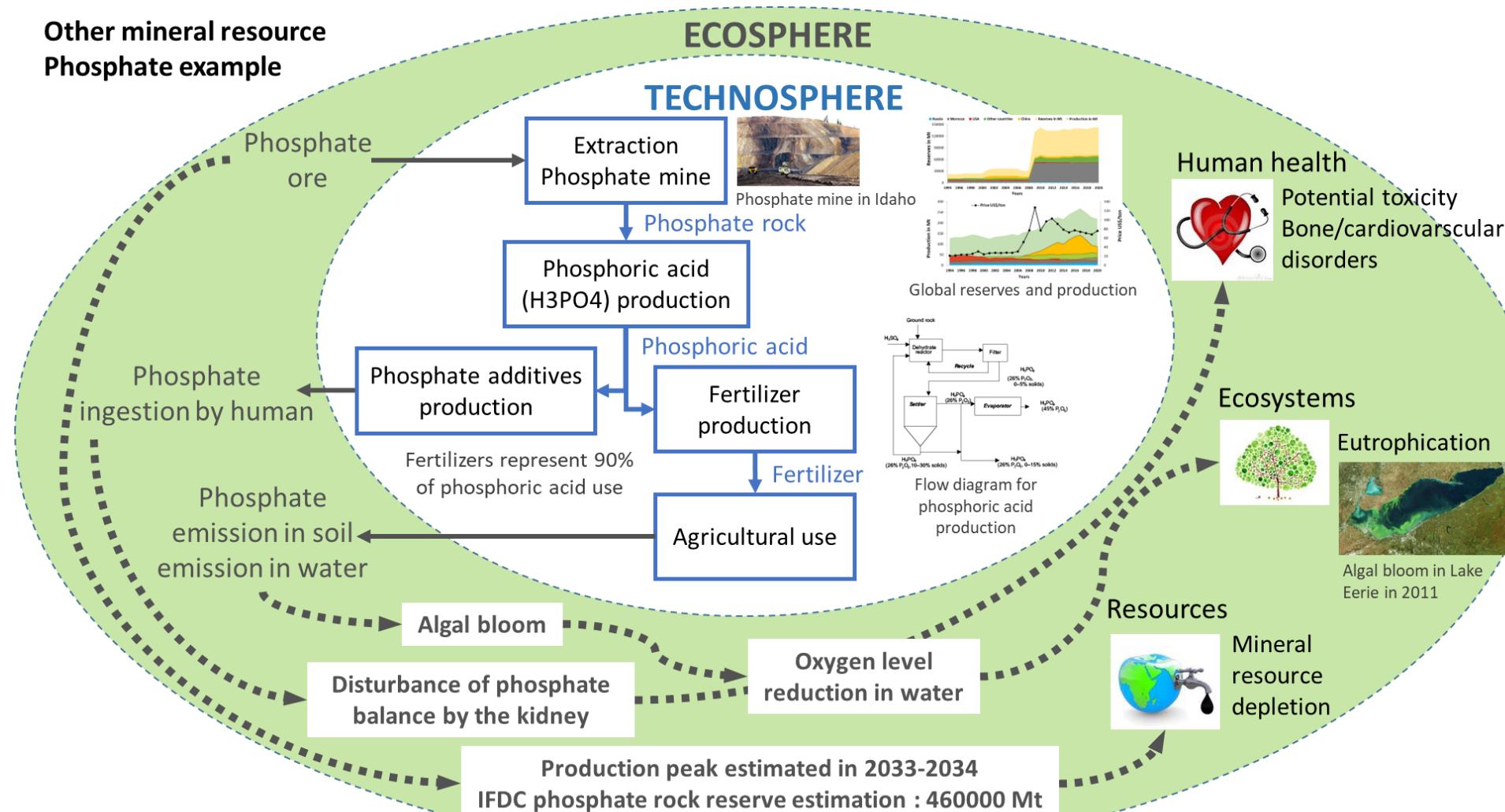
## Schéma synthèse d'une ACV



### Définitions :

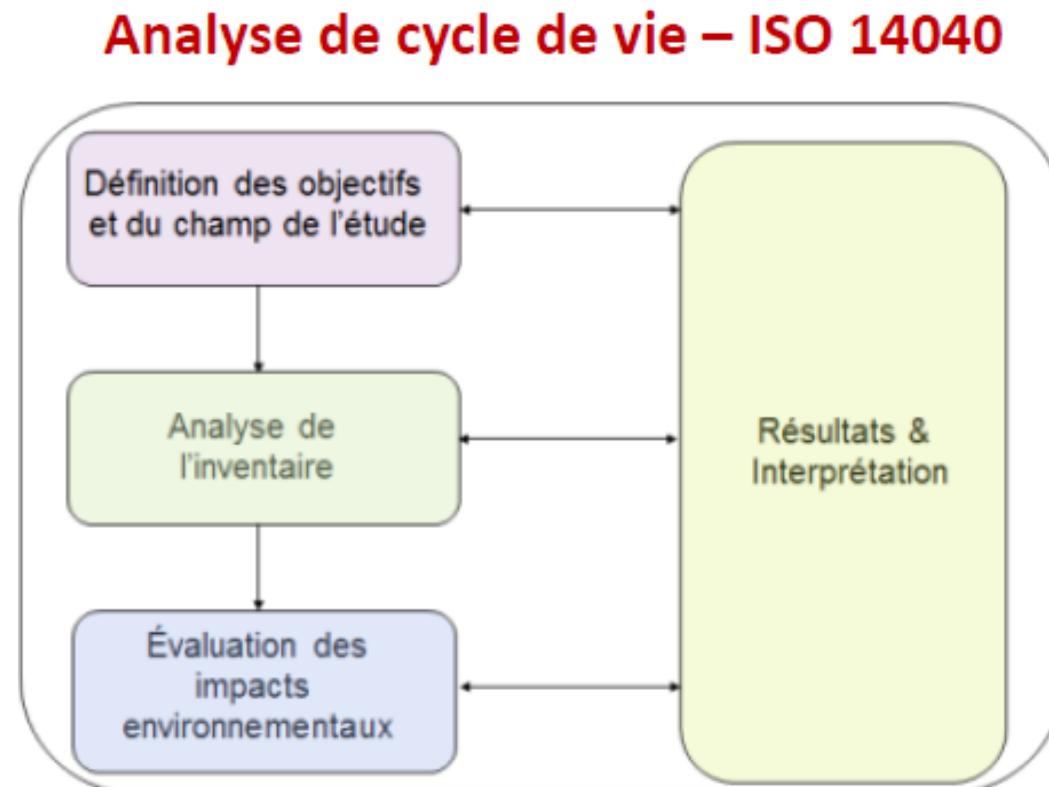
- Technosphère : Toutes les parties du monde existant qui **sont organisées** par l'homme
  - Ecosphère : Toutes les parties du monde existant qui **ne sont pas organisées** par l'homme
  - Flux intermédiaire : flux à l'intérieur de la technosphère
  - Flux élémentaire : flux entre l'écosphère et la technosphère
- Eco => Techno : Prélèvement  
 Techno => Eco : Rejet

## Schéma synthèse d'une ACV – Exemple pour le phosphate

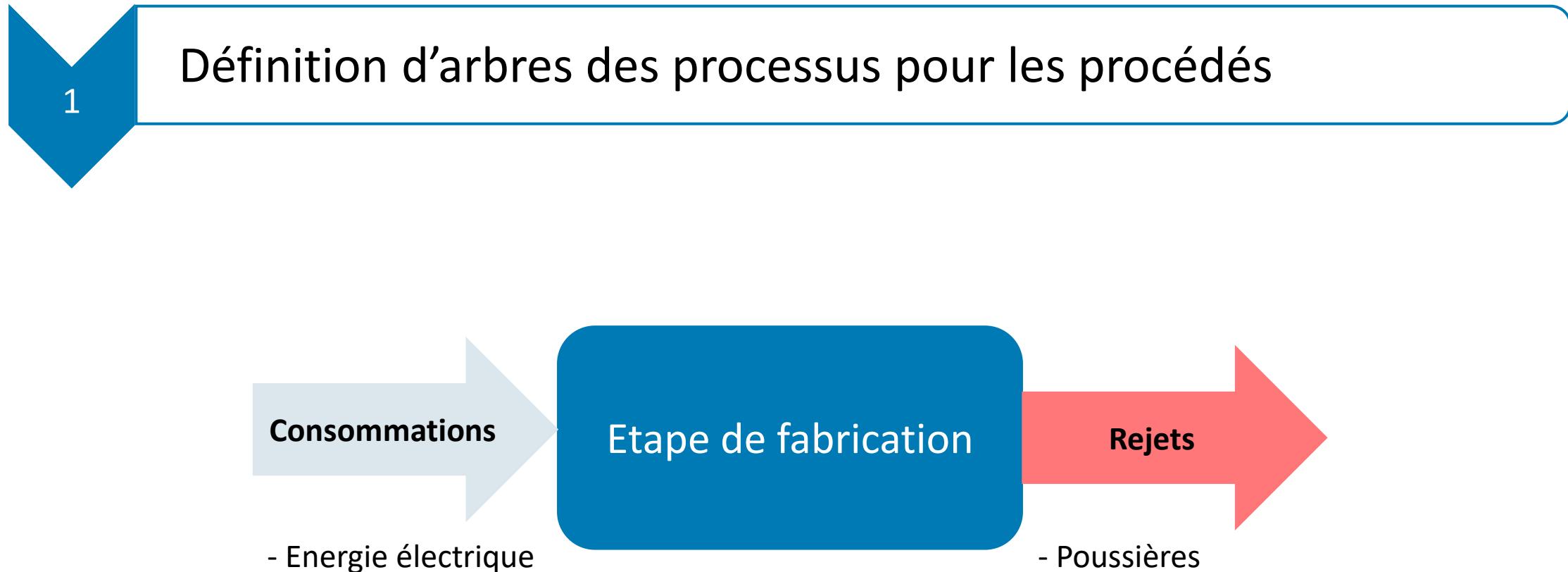


## Synthèse de la démarche ACV

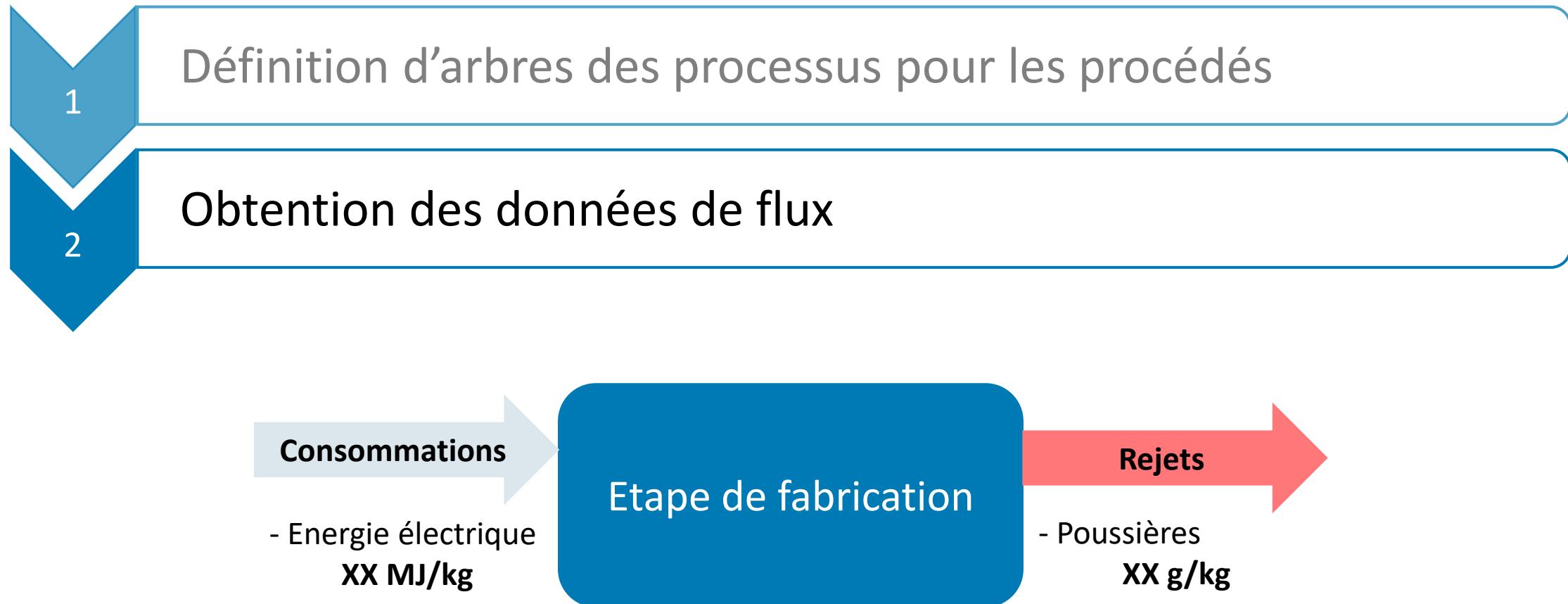
- Une unité fonctionnelle : **Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV (Norme ISO 14044)**
- Un périmètre
- Un arbre des processus
- Un inventaire des flux
- Une méthode de calcul des impacts environnementaux



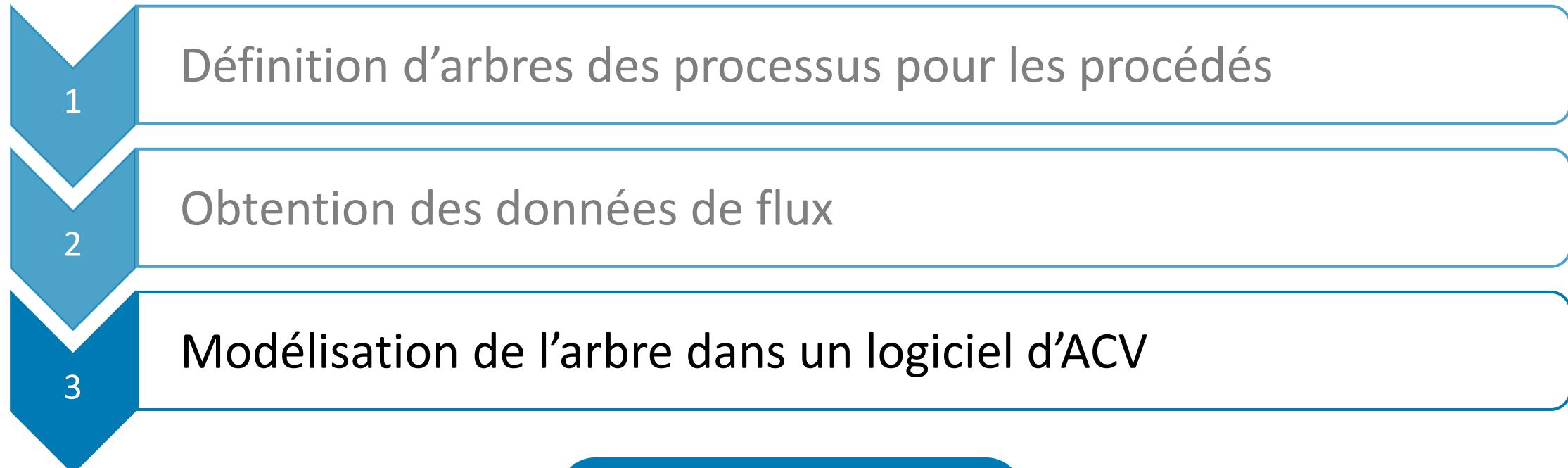
## Présentation de la démarche



## Présentation de la démarche



## Présentation de la démarche

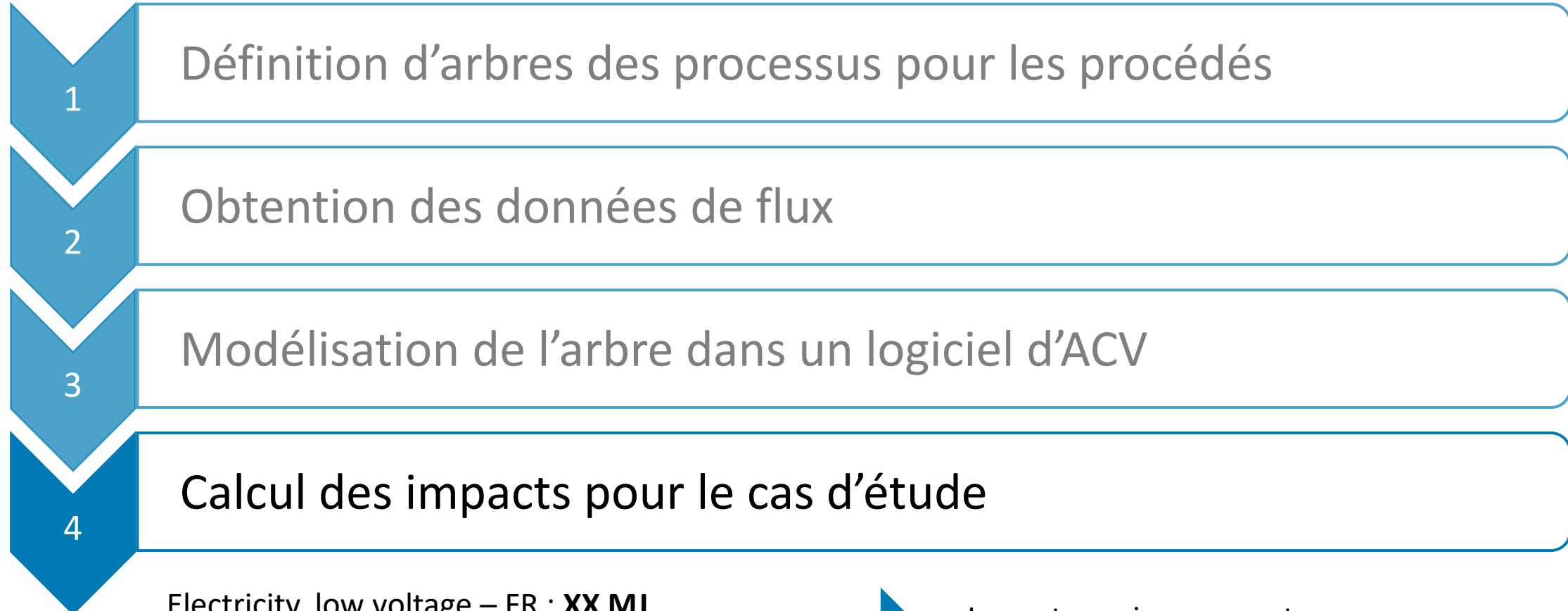


Electricity, low voltage, FR  
XX MJ/kg

Etape de fabrication

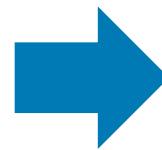
Particulate Matter, > 2.5 um and < 10um  
XX g/kg

## Présentation de la démarche



Electricity, low voltage – FR : **XX MJ**

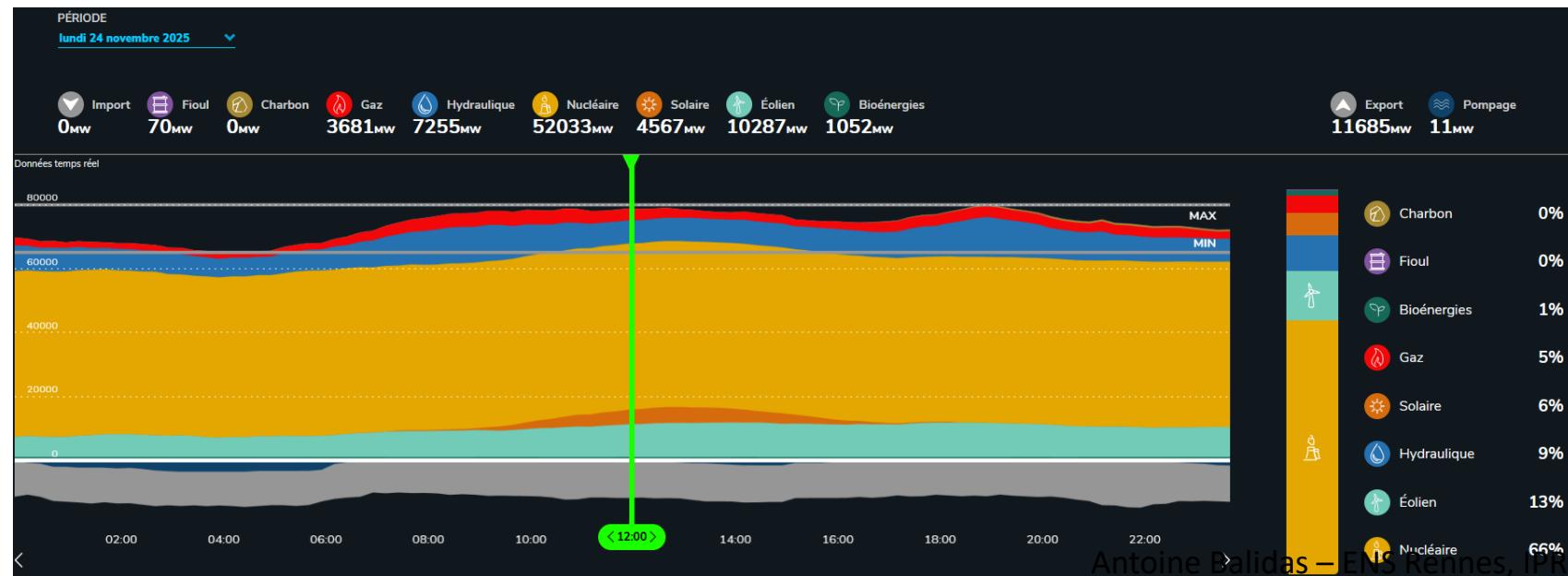
Particulate Matter, > 2.5 um and < 10um : **XX g**



Impacts environnementaux  
**16 indicateurs**

## Exemple de calcul d'impact – Site de RTE France

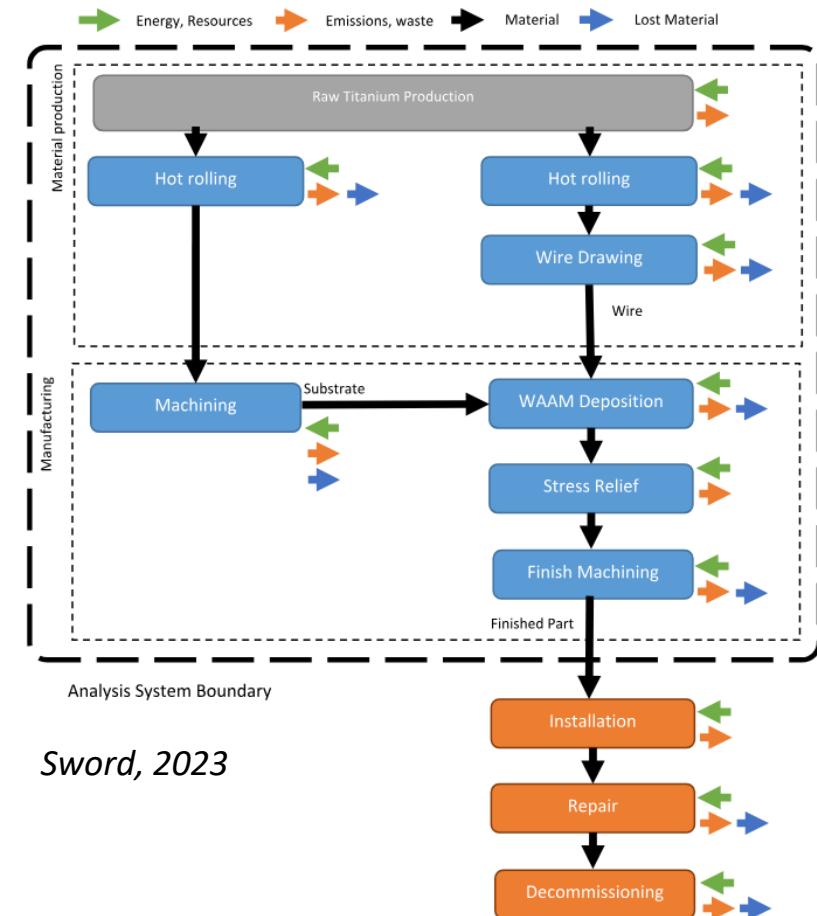
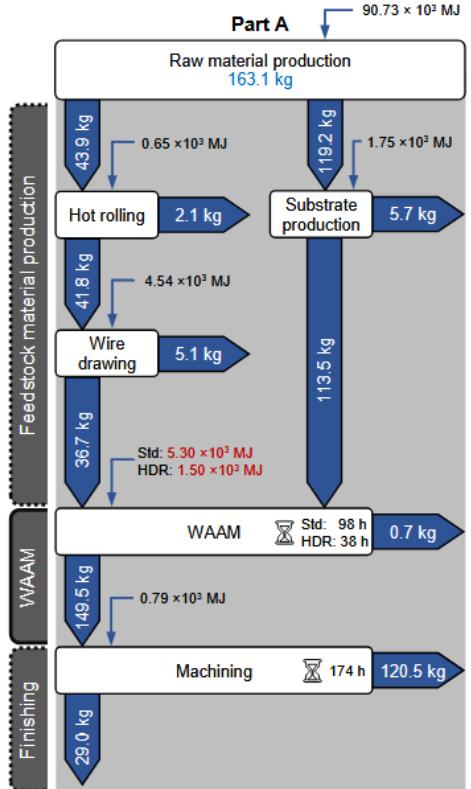
Visualisation en temps réel des émissions de CO<sub>2</sub>eq liées à la production d'énergie et dépendant du mix énergétique français



## Définition d'un arbre des processus pour le WAAM

**Objectif :** Définir un arbre des processus du WAAM pour être capable d'évaluer les pièces produites et de comparer le WAAM à d'autres technologies

Exemples d'arbres des processus issus de la littérature

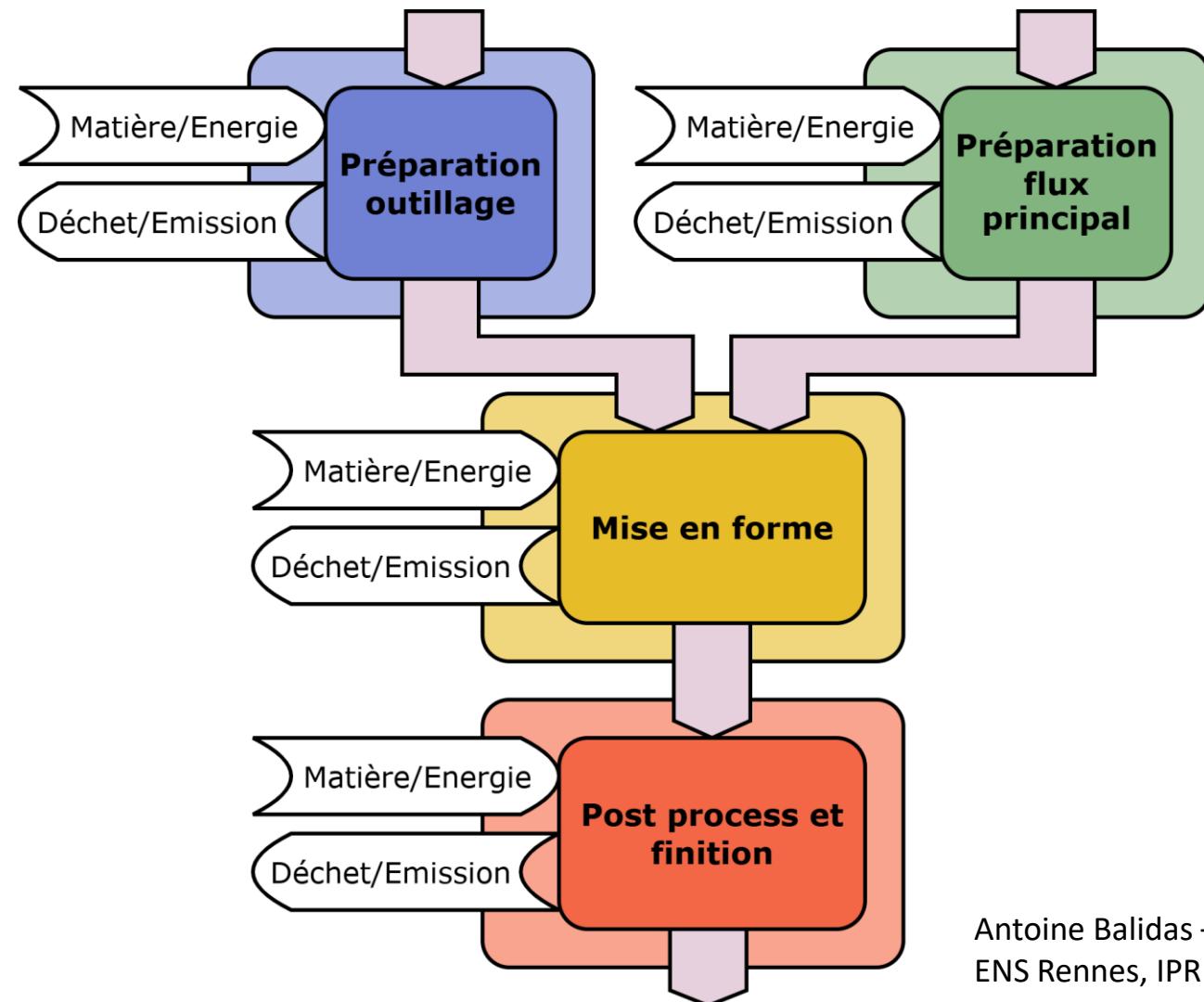


## Définition d'un arbre des processus standard

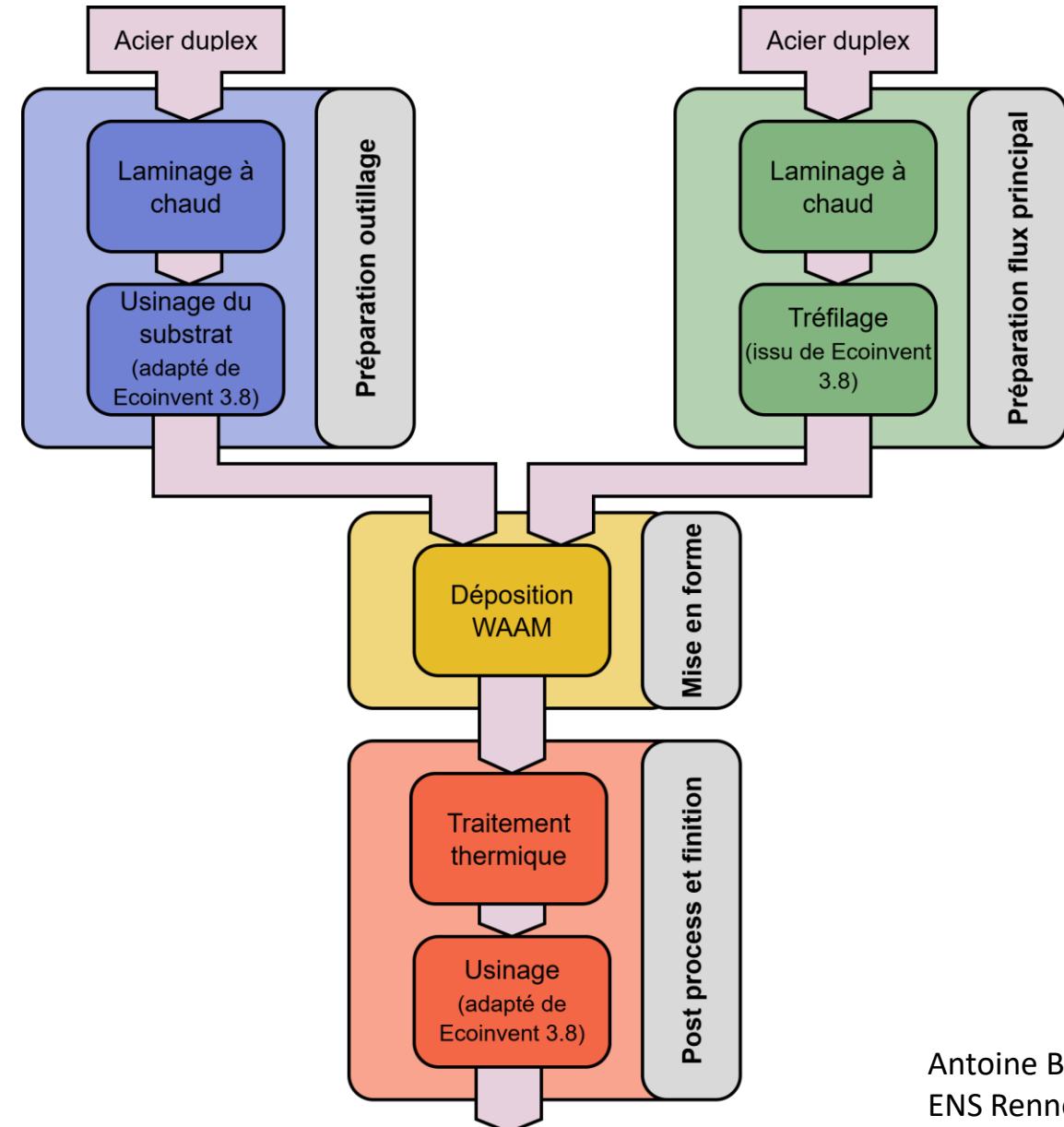
**Objectif :** Proposer une structure unique, adaptée aux procédés de fabrication pour faciliter l'étude et les comparaisons

Structure comprenant **4 phases** :

- Préparation outillage
- Préparation flux principal
- Mise en forme
- Post process – finition



## Application au WAAM – Structure



## Présentation du cas d'étude – Référence

**NAVAL**  
GROUP

**Cas d'étude :** Pale d'hélice – application marine (projet RAMSSES)

**Envergure :** ~ 4 m

**Matériau :** Acier inoxydable Duplex

**Masse :** 9391 kg

**Fabrication de référence :** Géométrie pleine réalisée en fonderie moulage sable (FMSRef)



*Hélice présentant de la pale de référence, Naval Group*

## Présentation du cas d'étude – Alternatives

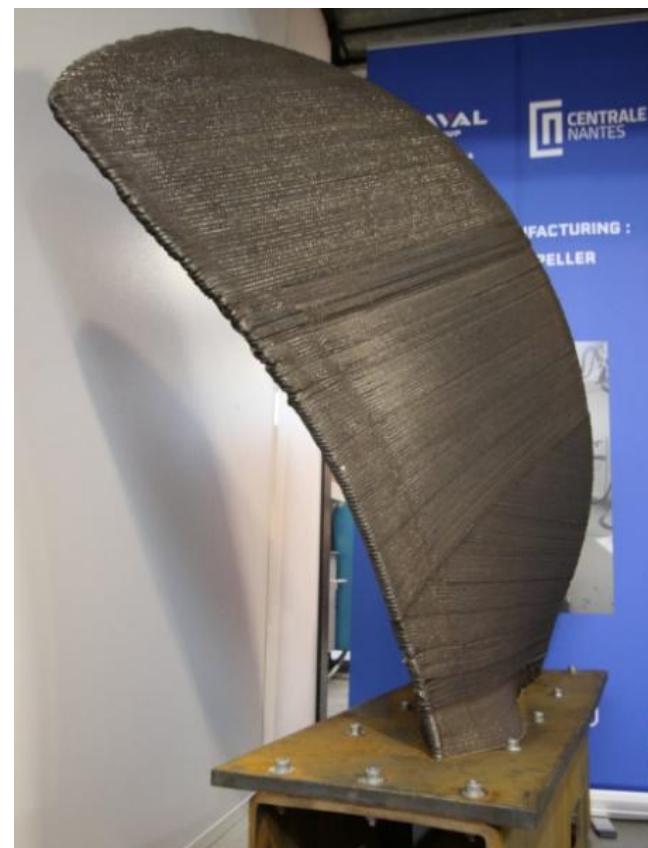
**Fabrications alternatives :** Différentes géométries réalisées en WAAM

**Alternative 1 :** Même géométrie,  
pleine (WAAMRef)

**Masse :** 9391 + 351 kg (substrat)

**Alternative 2 :** Géométrie  
optimisée, creuse (WAAMDfAM)

**Masse :** 6029 + 351 kg

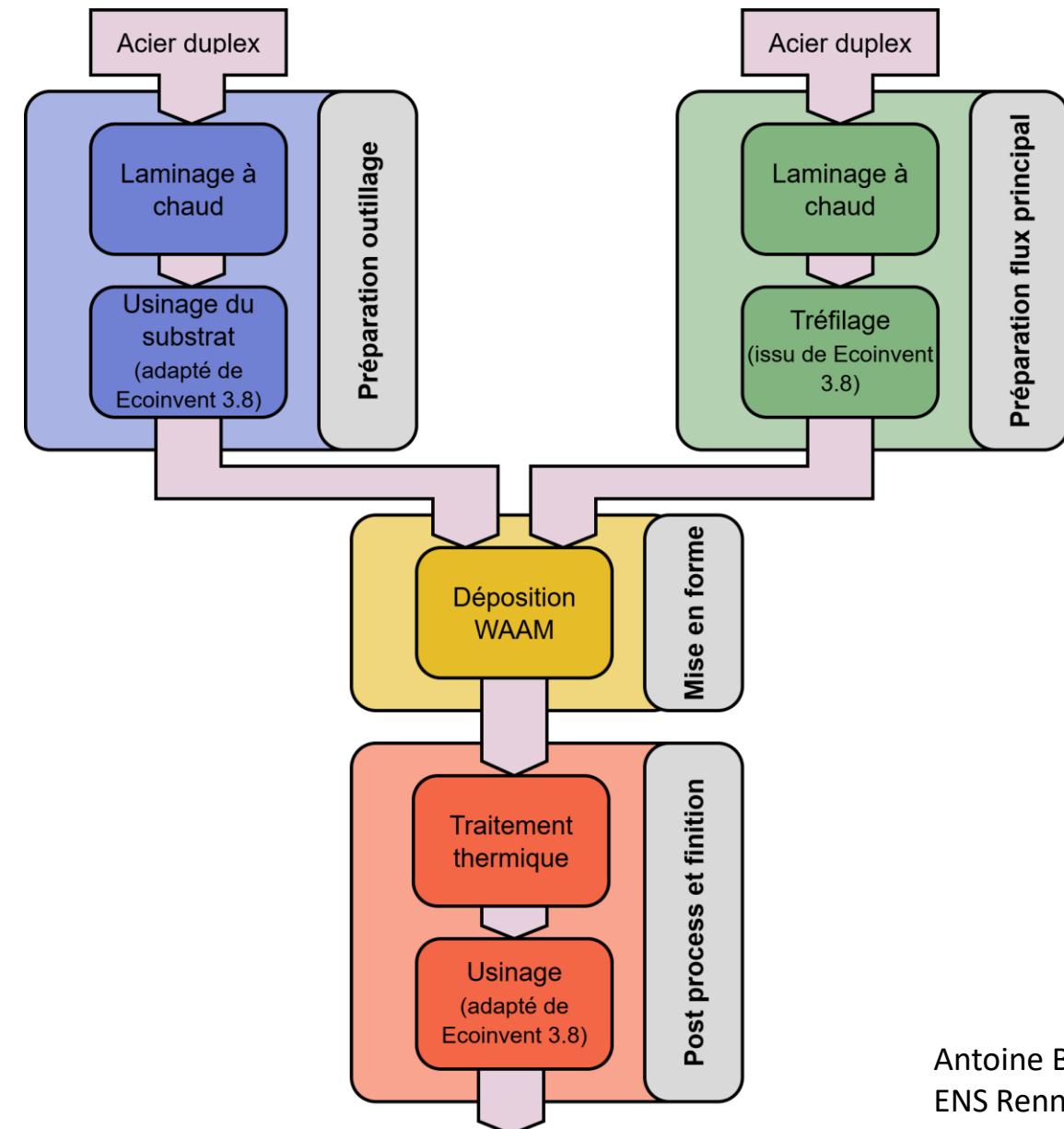


Pale déposée par WAAM (modèle ½) / Vision de la géométrie creuse / Pale après usinage, Centrale Nantes

## Présentation du cas d'étude – Cadre de l'ACV

- Unité fonctionnelle : Production par WAAM ou fonderie d'une pale satisfaisant les mêmes exigences sur la phase d'usage
- Périmètre : Cradle to gate
- Arbre des processus : Défini en section III
- Inventaire des flux : Détailé ensuite (sources : Ecoinvent 3.8, littérature, industriels et relevés expérimentaux)
- Méthode de calcul : EF 3.1

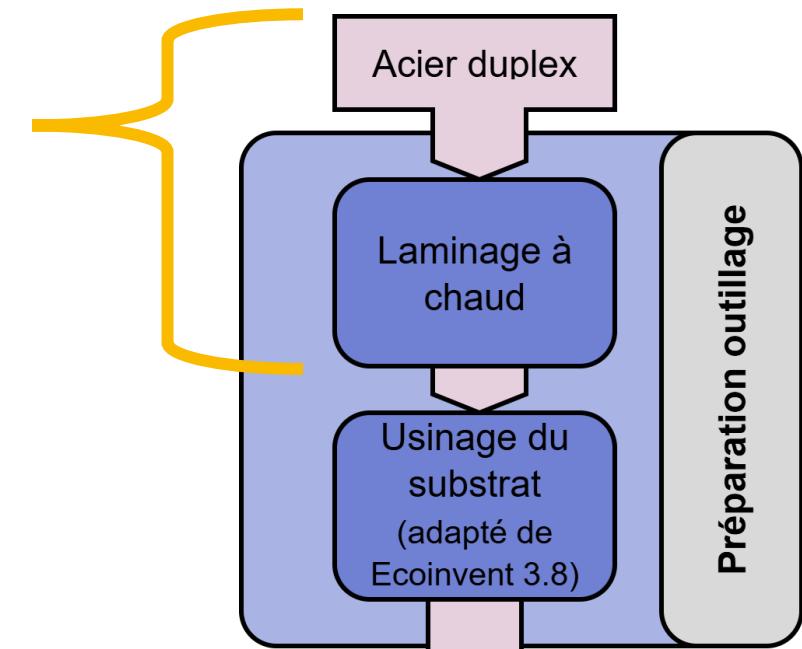
## Application au WAAM – Structure



## Application au WAAM – Détail des flux

### Acier Duplex :

- Données environnementales extraites d'une Environmental Product Declaration (EPD) produite par un industriel, Outokumpu, Finlande (Norme 15804+A2)
- Données pour la production de l'alliage et le laminage à chaud (13 indicateurs sur 16)



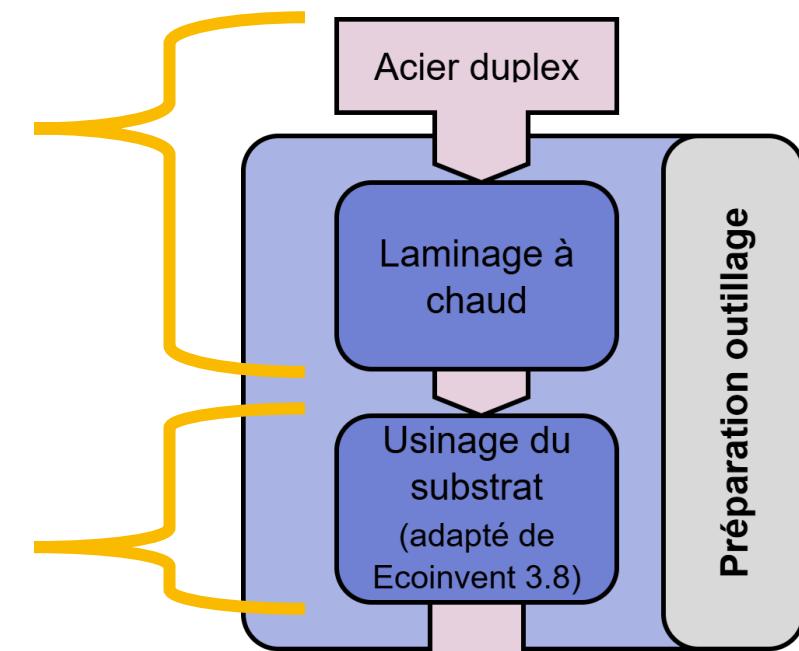
## Application au WAAM – Détail des flux

### Acier Duplex :

- Données environnementales extraites d'une Environmental Product Declaration (EPD) produite par un industriel, Outokumpu, Finlande (Norme 15804+A2)
- Données pour la production de l'alliage et le laminage à chaud (13 indicateurs sur 16)

### Usinage :

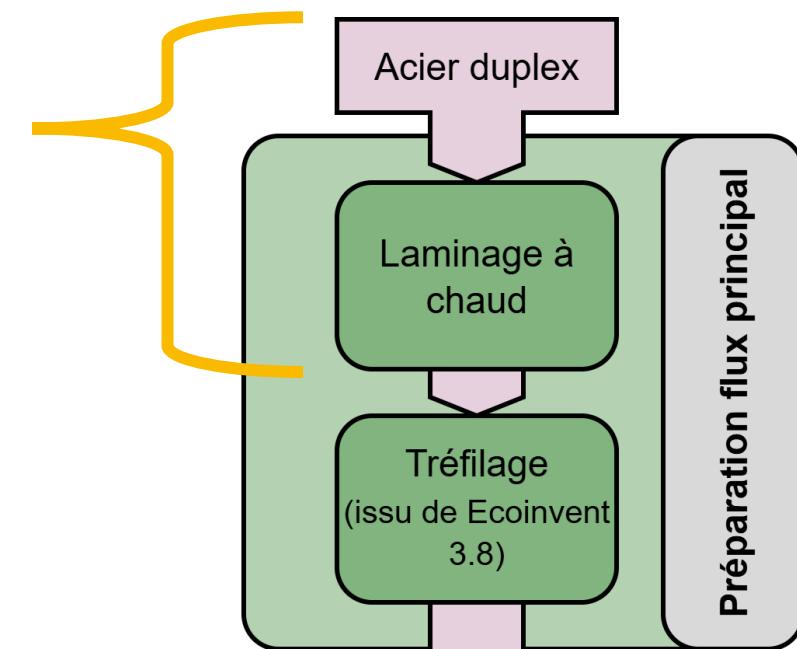
- Adaptation du procédé de Ecoinvent avec paramétrage de la consommation d'énergie
- Consommations : énergie, outil de coupe, lubrifiant, air comprimé, eau
- Rejets : copeaux, eau



## Application au WAAM – Détail des flux

### Acier Duplex :

- Données environnementales extraites d'une Environmental Product Declaration (EPD) produite par un industriel, Outokumpu, Finlande (Norme 15804+A2)
- Données pour la production de l'alliage et le laminage à chaud (13 indicateurs sur 16)



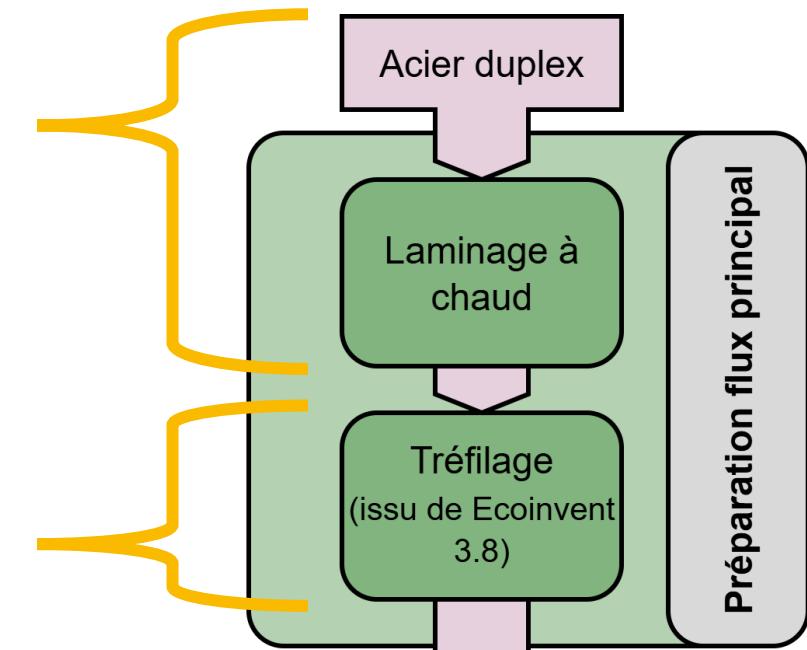
## Application au WAAM – Détail des flux

### Acier Duplex :

- Données environnementales extraites d'une Environmental Product Declaration (EPD) produite par un industriel, Outokumpu, Finlande (Norme 15804+A2)
- Données pour la production de l'alliage et le laminage à chaud (13 indicateurs sur 16)

### Tréfilage :

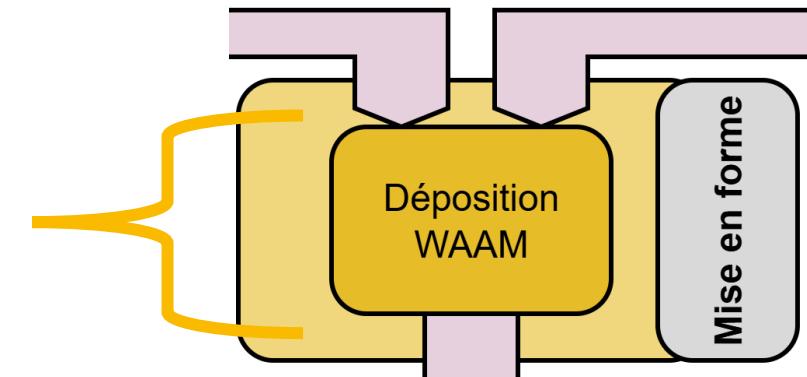
- Réutilisation du procédé de Ecoinvent (procédé pour l'acier permettant d'obtenir un fil  $\varnothing 1-2$  mm)



## Application au WAAM – Détail des flux

Déposition WAAM :

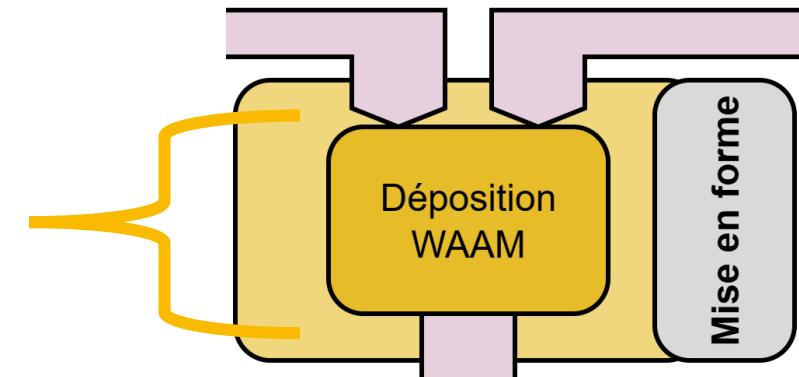
- Consommations :
  - Energie : Mesures expérimentales pour le générateur et le robot avec augmentation du taux de dépôt



## Application au WAAM – Détail des flux

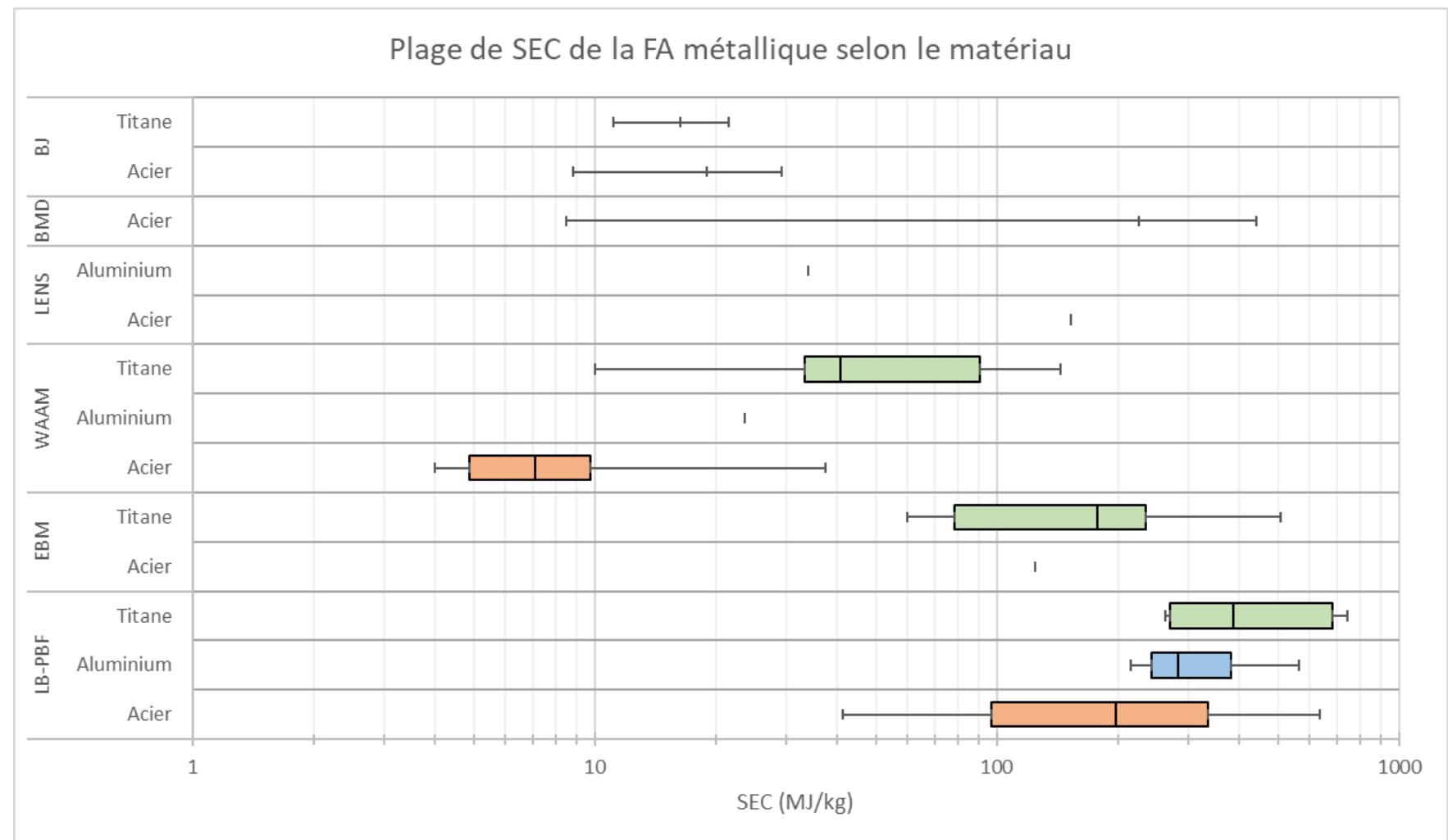
**Déposition WAAM :**

- Consommations :
  - Energie : Mesures expérimentales pour le générateur et le robot avec augmentation du taux de dépôt



## Application au WAAM – Consommation énergétique du WAAM

Revue de littérature sur le SEC de la FA métallique, mise en avant de l'efficacité énergétique du WAAM



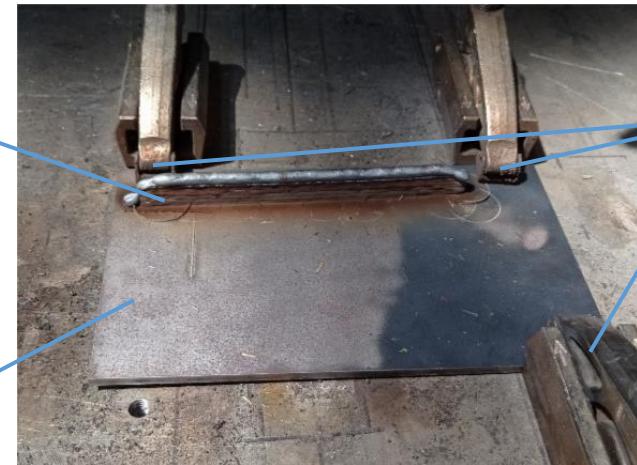
## Application au WAAM – Consommation énergétique du WAAM

Expérimentation sur la consommation du WAAM en fonction du taux de dépôt



Equipements WAAM : Cellule robotisée Yaskawa et générateur type CMT, Centrale Nantes

Cordons formant un mur  
Substrat

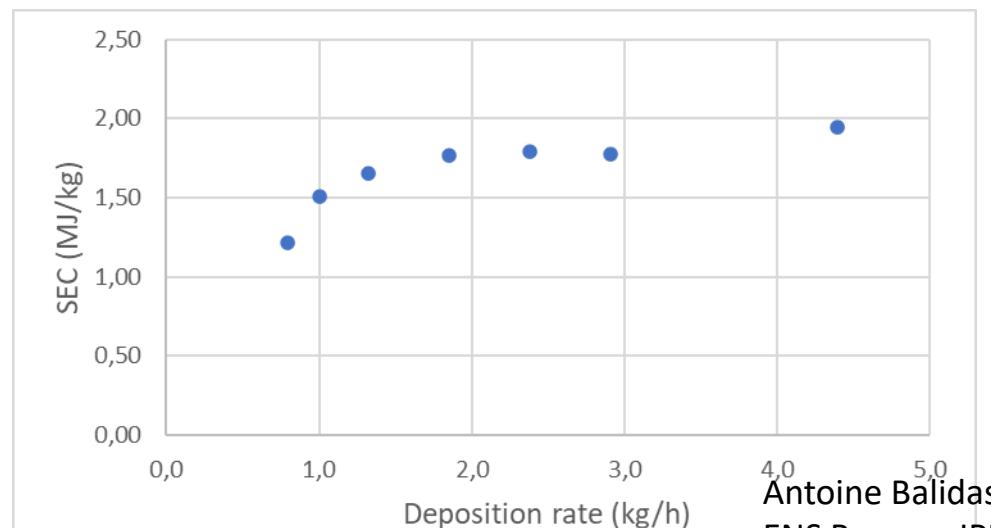


Dispositif pour le dépôt de cordons

### Paramètres expérimentaux

Taux de dépôt DR (kg/h)	Vitesse d'alimentation du fil WFS (m/min)	Vitesse de déplacement TS (m/min)	WFS/TS	I (A)	U(V)
0,8	1,5	0,125	12,0	65	11,3
1,0	1,9	0,158	12,0	72	11,9
1,3	2,5	0,208	12,0	90	12
1,9	3,5	0,291	12,0	125	14
2,4	4,5	0,375	12,0	153	16
2,9	5,5	0,441	12,5	180	16,9
4,4	8,3	0,696	11,9	250	20

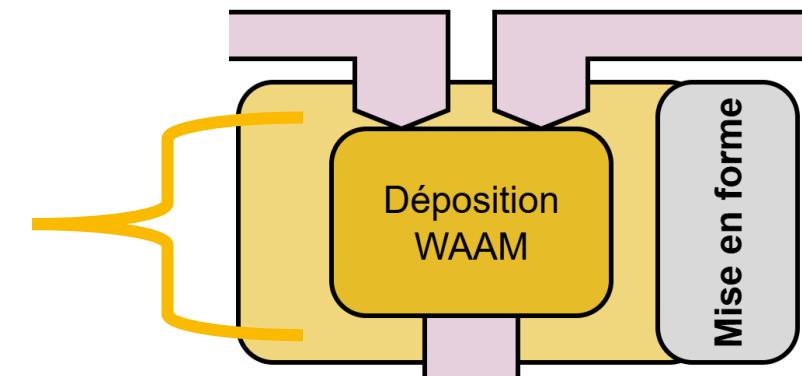
### Résultats sur le SEC



## Application au WAAM – Détail des flux

Déposition WAAM :

- Consommations :
  - Energie : Mesures expérimentales pour le générateur et le robot avec augmentation du taux de dépôt
  - Gaz de protection : Estimation par rapport au débit et à la durée de fabrication – Composition 85% Ar, 15% CO<sub>2</sub>, ajustable
- Rejets : Pas de données disponibles



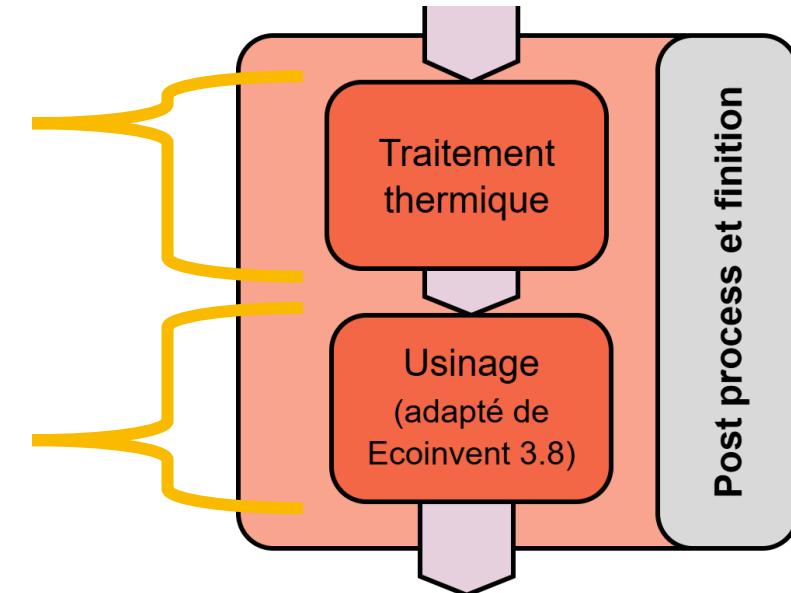
## Application au WAAM – Détail des flux

### Traitement thermique :

- Une seule donnée de consommations énergétique pour un traitement thermique WAAM

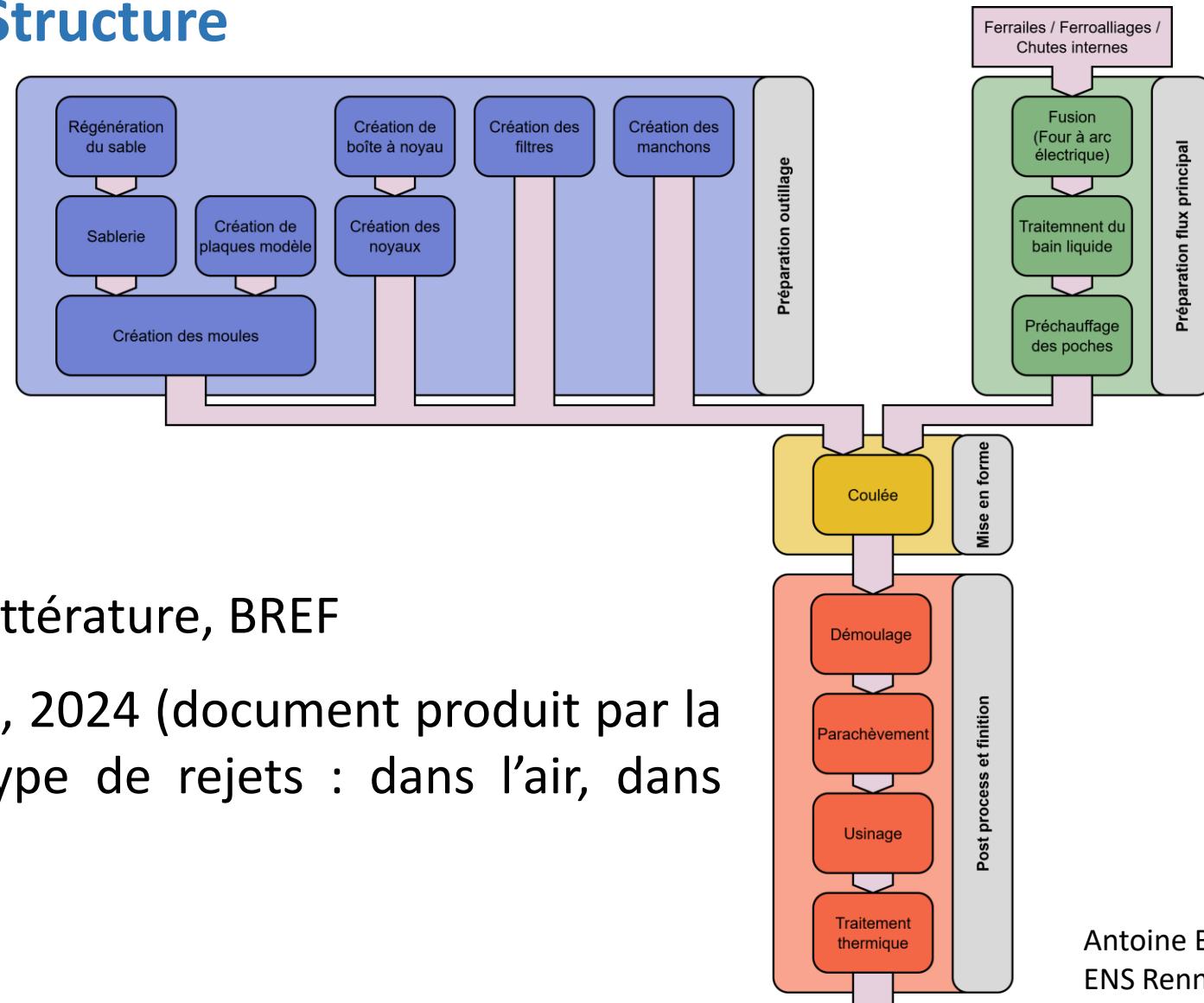
### Usinage :

- Adaptation du procédé de Ecoinvent avec paramétrage de la consommation d'énergie
- Consommations : énergie, outil de coupe, lubrifiant, air comprimé, eau
- Rejets : copeaux, eau



## Application à la fonderie – Structure

Structure définie avec  
l'entreprise Safe Metal

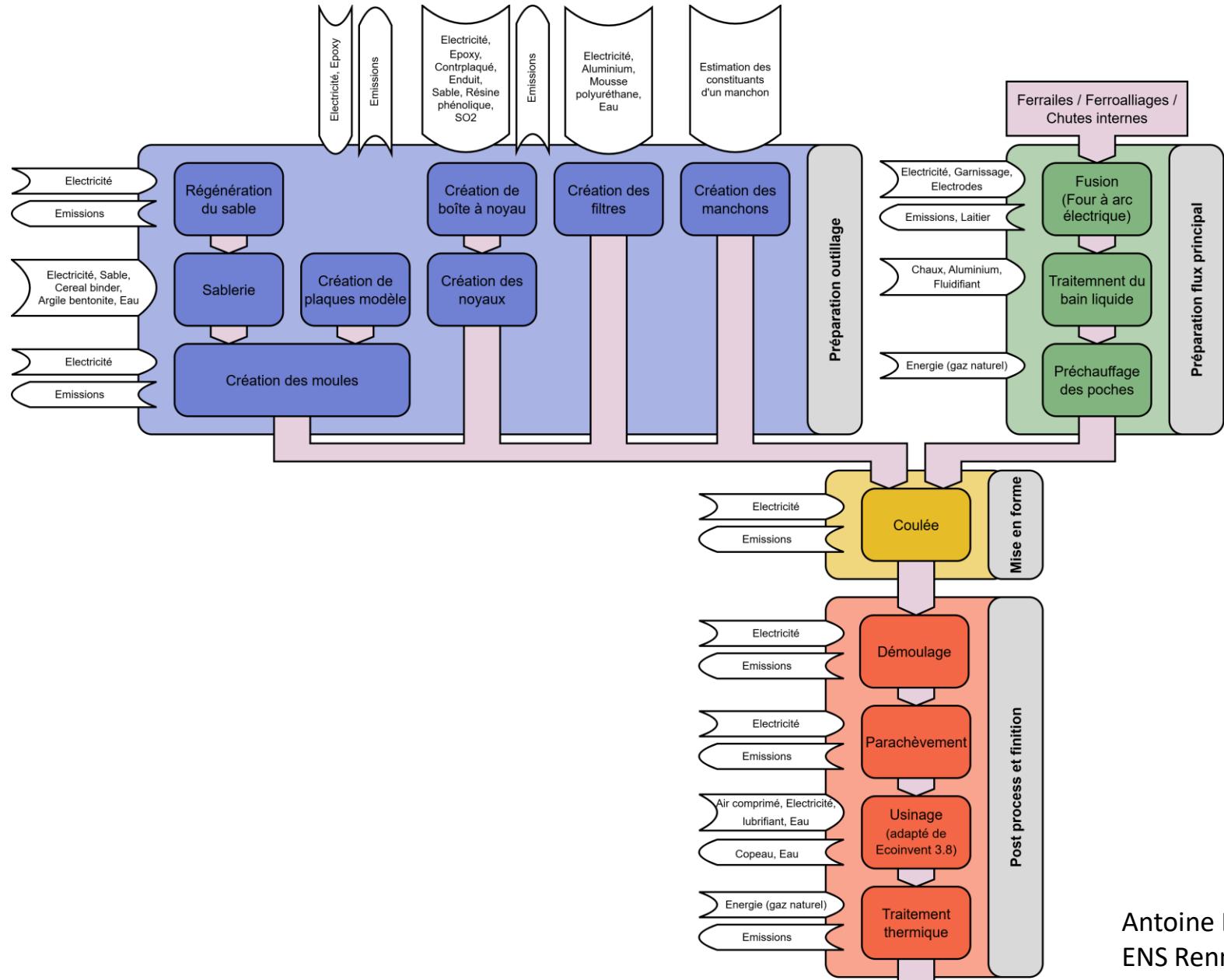


Sources des données :

Consommations : Safe Metal, Littérature, BREF

Rejets : BREF Forge et Fonderie, 2024 (document produit par la Commission Européenne) – Type de rejets : dans l'air, dans l'eau et au sol

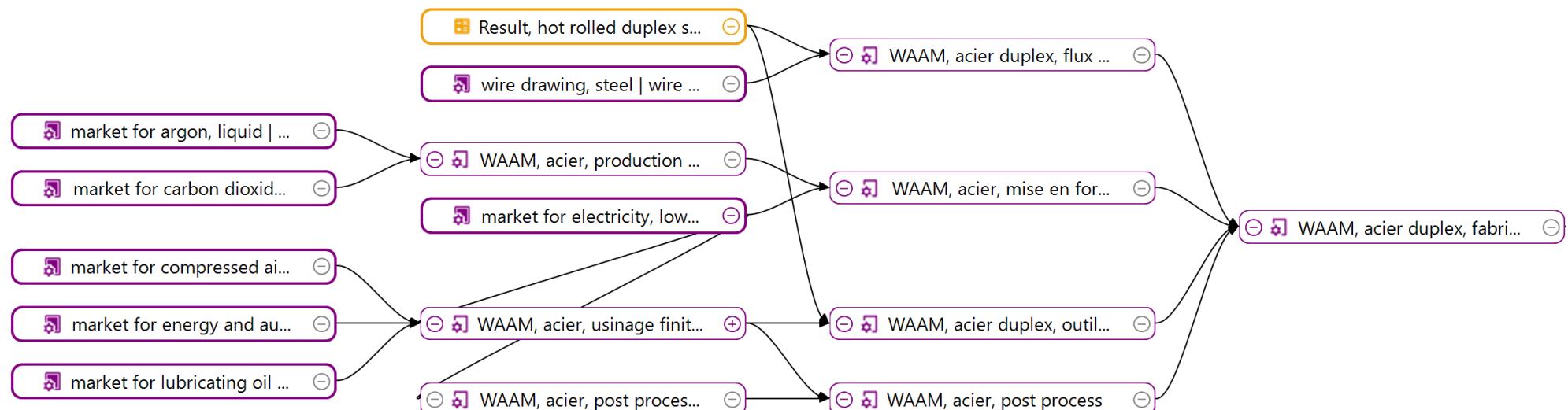
## Application à la fonderie – Structure



## Passage sur le logiciel et paramétrage du cas d'étude

### Objectifs :

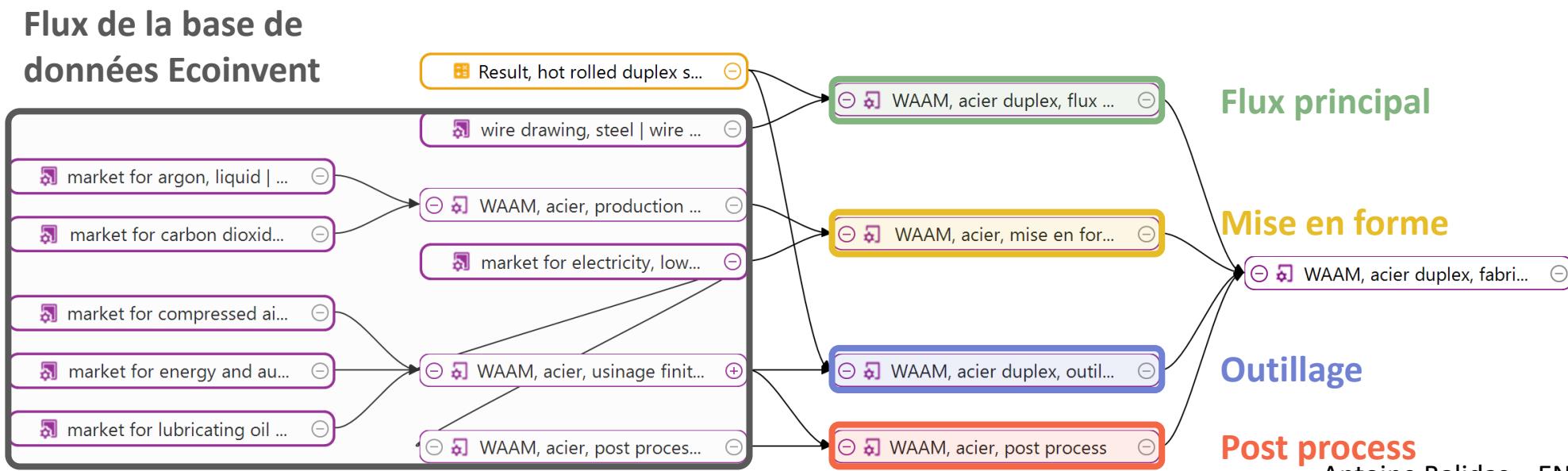
- Reconstruire les arbres des processus dans le logiciel (OpenLCA) et faire correspondre les flux listés avec la base de données
- Définir des paramètres permettant de configurer un cas d'étude (ex : masse de la pièce, masse à usiner, paramètre de fabrication...)



## Passage sur le logiciel et paramétrage du cas d'étude

### Objectifs :

- Reconstruire les arbres des processus dans le logiciel (OpenLCA) et faire correspondre les flux listés avec la base de données
- Définir des paramètres permettant de configurer un cas d'étude (ex : masse de la pièce, masse à usiner, paramètre de fabrication...)



## Obtention des résultats bruts

Paramétrage et calcul des 3 scénarios avec la méthode EF 3.1 (16 indicateurs)

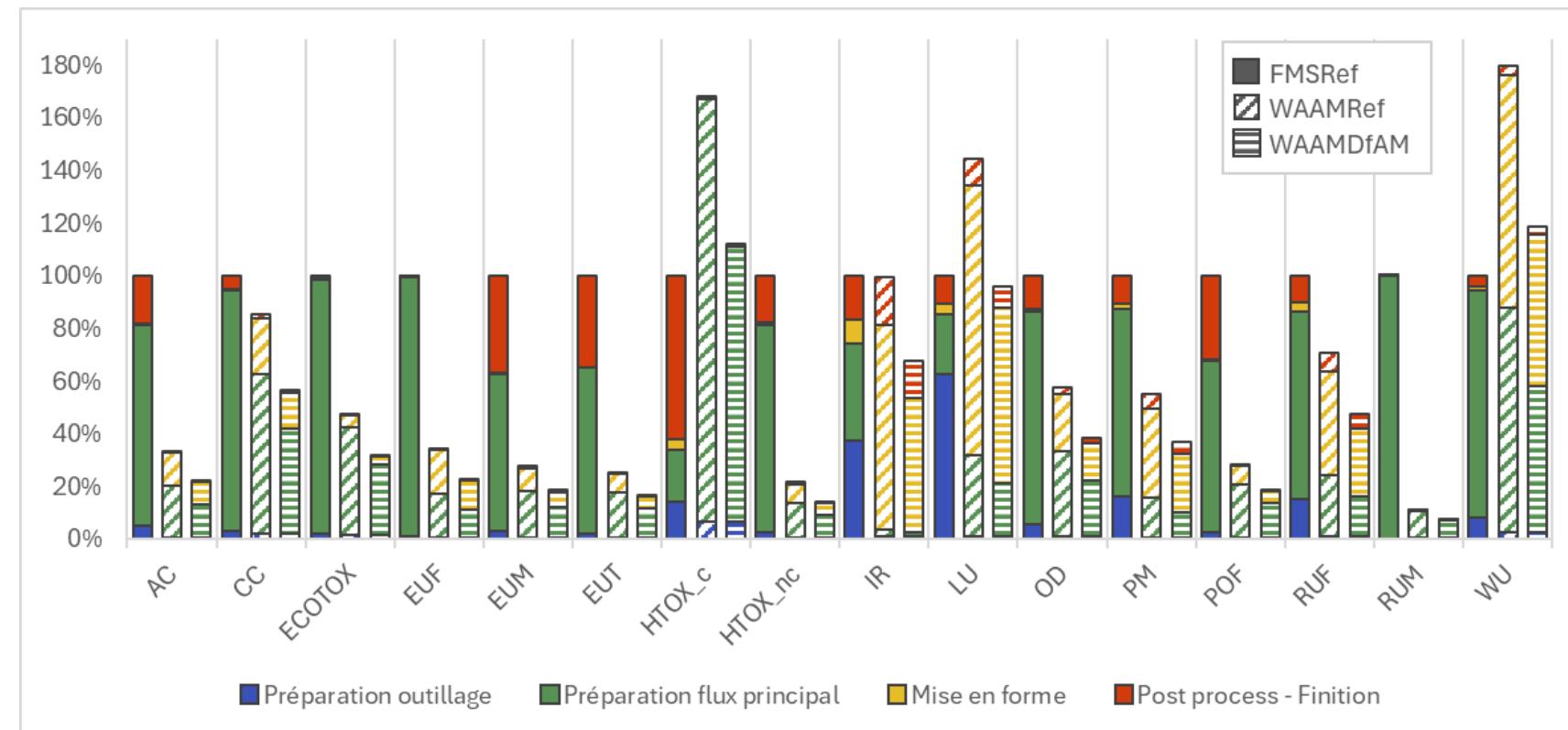
*Impacts environnementaux  
pour le scénario WAAMRef*

Name	Impact assessment result
> Acidification	147.33679 mol H+ eq
> Climate change	4.27732E4 kg CO2 eq
> Ecotoxicity freshwater	3.13130E5 CTUe
> Eutrophication freshwater	18.91012 kg P eq
> Eutrophication marine	31.04125 kg N eq
> Eutrophication terrestrial	321.82692 mol N eq
> Human toxicity cancer	0.00140 CTUh
> Human toxicity non-cancer	0.00049 CTUh
> Ionising radiation (human health)	1.59108E4 kBq U235 eq
> Land use	5.08527E4 dimensionless (pt)
> Ozone depletion	0.00160 kg CFC11 eq
> Particulate matter	0.00037 disease incidence
> Photochemical ozone formation (human health)	93.61863 kg NMVOC eq
> Resource use fossils	6.40607E5 MJ (net calorific)
> Resource use minerals and metals	2.57810 kg Sb eq
> Water use	4.65147E4 m3 world eq

## Exploitation des résultats – Comparaison des scénarios

Résultats comparatifs pour les 16 indicateurs en fixant FMSRef comme référence

- Contribution des phases variant d'un procédé à l'autre et d'un indicateur à l'autre
- Phase la plus impactante en fonderie : flux principal
- Phases les plus impactante en WAAM : flux principal et mise en forme
- Impact globalement plus faible pour le WAAM que pour la fonderie



## Exploitation des résultats – Calcul d'un score unique

La méthode EF 3.1 propose un score unique EF (Environmental Footprint) agrégeant les 16 indicateurs avec une pondération pour chacun basée sur leur criticité et leur robustesse

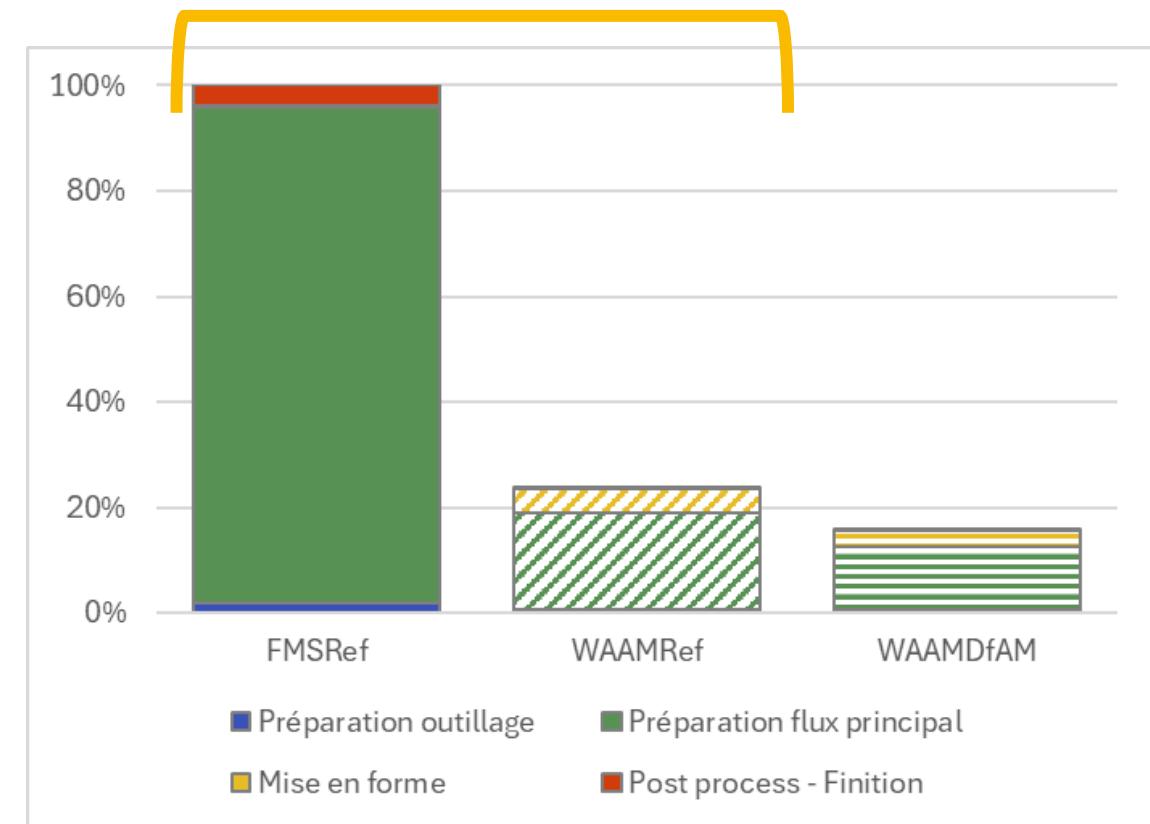
**The recommended weighting set, robustness factors and final weighting factors for all midpoint impact categories<sup>1</sup>**

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

## Exploitation des résultats – Comparaison des scénarios

Agrégation des 16 indicateurs en un single score ou Environmental Footprint (EF)

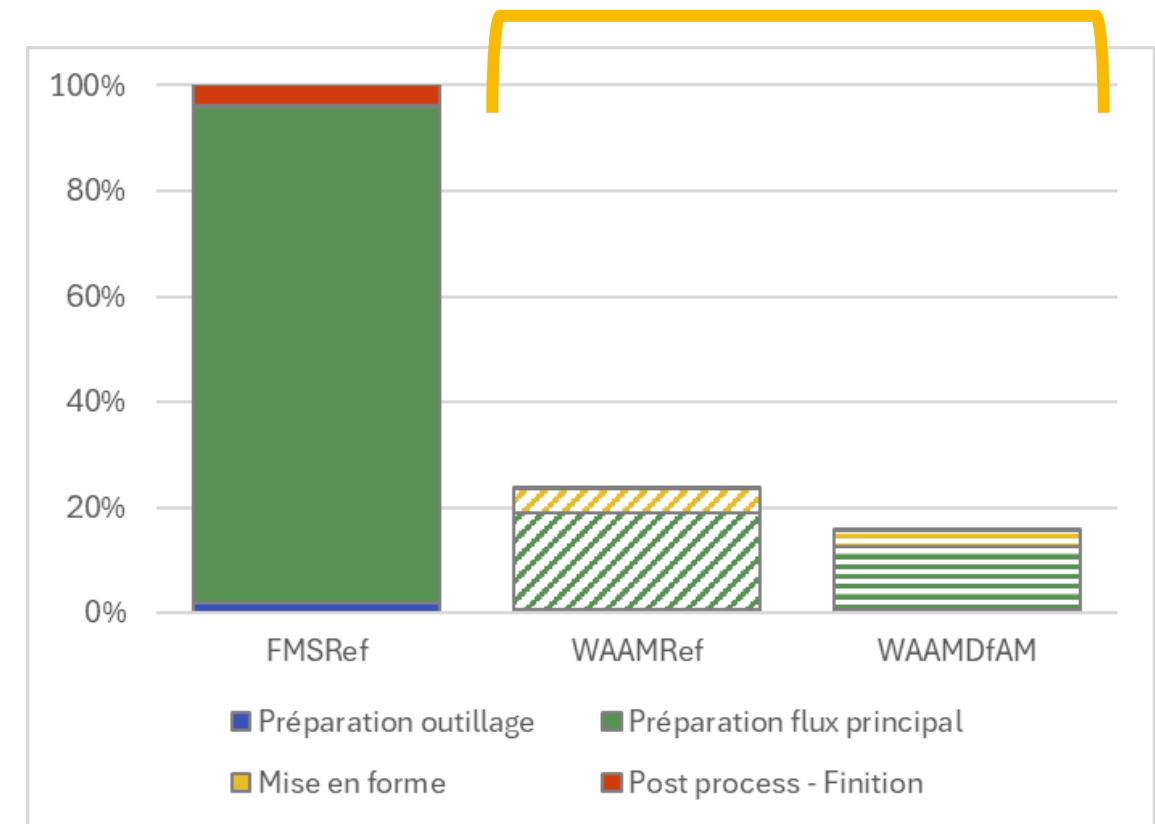
- Réduction importante des impacts (76%) sur un périmètre cradle-to-gate pour le WAAM par rapport à la fonderie avec :
  - La même masse de pièce
  - La même qualité



## Exploitation des résultats – Comparaison des scénarios

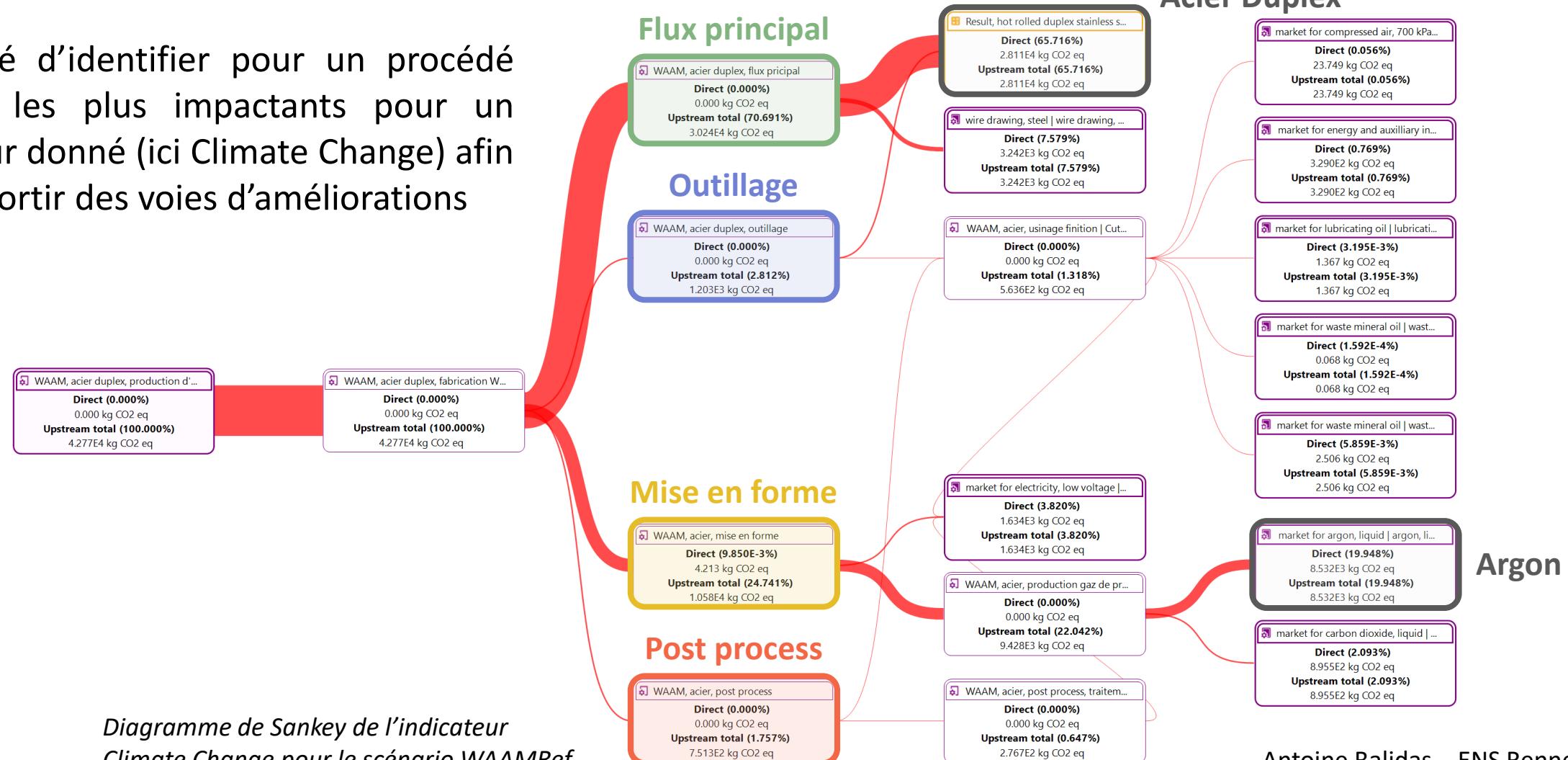
Agrégation des 16 indicateurs en un single score ou Environmental Footprint (EF)

- Réduction d'impact grâce à la démarche DfAM :
  - Réduction d'impact correspondant au gain de masse (33%)



## Exploitation des résultats – Contribution des phases/flux et leviers d'action

Possibilité d'identifier pour un procédé les flux les plus impactants pour un indicateur donné (ici Climate Change) afin d'en ressortir des voies d'améliorations



## Accessibilité de l'ACV aux concepteur/preneur de décision – Calcul

Problématique : Permettre au concepteur de réaliser des calculs ACV « simple » lors de l'étape de conception pour éclairer la prise de décision

⇒ **Développement d'un outil de calcul ACV pour les procédés**

Difficultés :

- Ne pas dégrader la modélisation et donc les résultats ACV
- Définir des paramètres de configuration du cas d'étude accessibles au concepteur

=> Outil OCAPI (Outil CAlcul Procédé Impact) permettant la création et comparaison de cas pour le WAAM, le LB-PBF et la fonderie

## Accessibilité de l'ACV aux concepteur/preneur de décision – Résultats

Problématique : Rendre les résultats ACV compréhensibles et utilisables pour la prise de décision

- Forme des résultats ? 16 indicateurs, score unique, sélection mais attention aux transferts d'impacts
- Intégrer le critère environnemental dans une prise de décision déjà multicritères

Inspirations : Mise en place d'un affichage environnemental dans le domaine du textile à destination des consommateurs (Octobre 2025)

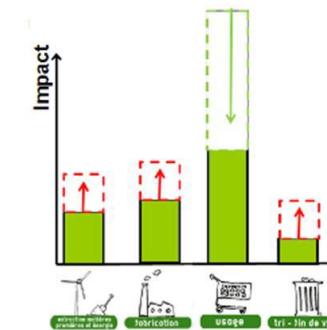
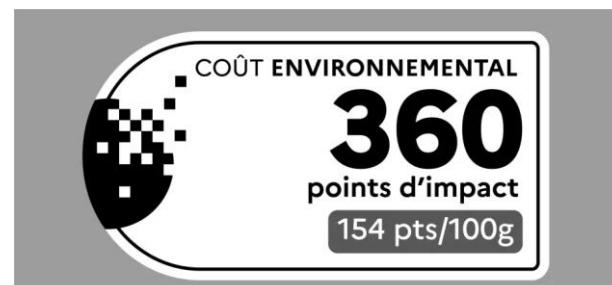


Illustration du transfert d'impact  
d'une étape du cycle de vie à d'autres étapes.

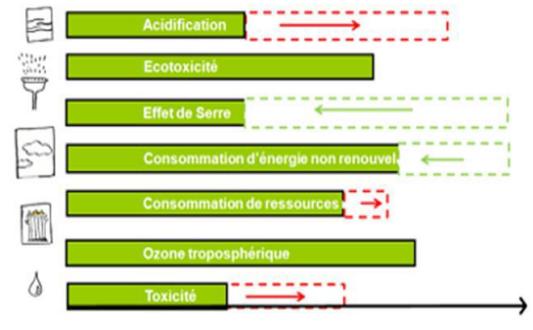
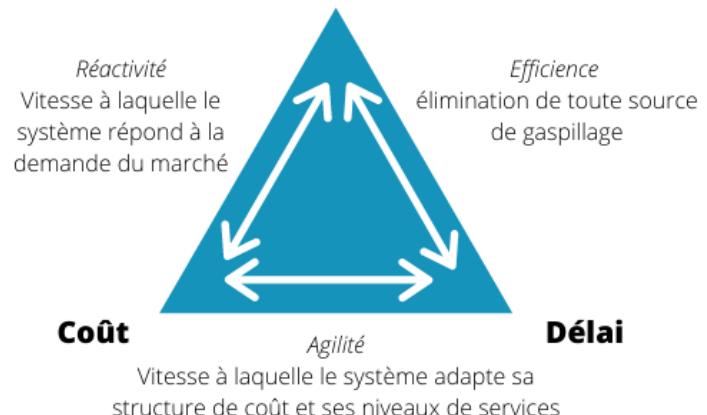


Illustration du transfert d'impacts  
à d'autres impacts environnementaux

### Qualité



## Perspectives pour la réduction d'impacts avec le WAAM

- Intérêt du WAAM sur des cas d'étude industriel de pièces de grandes dimensions par rapport à la fabrication traditionnelle
- Exploitation des opportunités offertes par la fabrication WAAM, DfAM, optimisation topologique pour la réduction de masse et donc la réduction d'impacts
- Focus sur la fabrication mais des réductions peuvent apparaître sur les autres phases du cycle de vie

Notion de gains environnementaux (Le Gentil, Cosmer) :

- Gain direct : lié à la fabrication (matière, énergie)
- Gain indirect : lié aux autres phases par exemple sur la consommation d'énergie lors de la phase d'usage (pièce active)
- Gain propagé : lié à l'adaptation du système et aux gains qu'elle peut engendré



# Conclusion

## Analyse environnementale de procédés

- Proposition d'une structure unique pour modéliser un procédé de fabrication
- Application au WAAM et à la fonderie
- Obtention et validation de données de flux pour le WAAM et la fonderie

## Traitement d'un cas d'étude comparant WAAM et fonderie

- Définition de paramètres permettant la configuration et le calcul de scénarios
- Exploitation de résultats d'analyse environnementale et identification des phases et flux les plus impactants

## Soutenabilité du WAAM

- Mise en avant d'une importante réduction d'impact par rapport à la fonderie sur la même pièce
- Intérêt d'une démarche DfAM pour la réduction d'impact



## **ANF Fab3D métallique**

**Procédés de dépôts plasma et laser par fil fondu  
pour l'impression métallique 3D (WAAM et WLAM)**

Bourges, 24-25-26 novembre 2025

# **Durabilité du procédé : Analyse de cycle de vie et impact environnementale du WAAM**

**Merci de votre attention**

Antoine Balidas – [antoine.balidas@ens-rennes.fr](mailto:antoine.balidas@ens-rennes.fr)