



Analyse de cycle de vie

Présentation de la méthode d'ACV et application à l'écoconception des bâtiments et des quartiers

Charlotte Roux (MINES Paris)

Marie-Lise Pannier (Université d'Angers)

Aurore Wurtz (Université de Bordeaux)

16/05/2024



Qui sommes-nous ?



Marie-Lise Pannier

Maître de conférence à l'université d'Angers
Énergétique, ACV et confort des bâtiments connectés

Post-doctorats à l'université Savoie Mont Blanc et à l'université de Bordeaux :
optimisation en rénovation

- ACV des bâtiments
- Analyse d'incertitudes
- Analyse de sensibilité



Aurore Wurtz



Post-doctorante à l'École des Ponts
Développement de méthodes d'ACV à destination de la maîtrise d'ouvrage

Post-doctorat à l'université de Bordeaux
ACV d'un projet d'aménagement urbain

- ACV des bâtiments
- Optimisation multicritère
- Echelle de l'îlot

Qui sommes-nous ?



Charlotte Roux

Chargée de recherche à MinesParis PSL

Ecoconception des bâtiments et des quartiers

Post-doctorats à l'école des ponts ENPC sur l'ACV de modes de construction innovants

Enseignante-chercheure à l'EIVP, chargée du pôle économie circulaire

Thèses de doctorat

- ACV des bâtiments/quartiers
- ACV dynamique
- Analyse prospective
- Approche conséquentielle



Déroulé de la présentation

Introduction

1. Historique

2. Méthodologie

3. Outils

4. Problématiques de recherche

Conclusion

Introduction

Contexte et enjeux

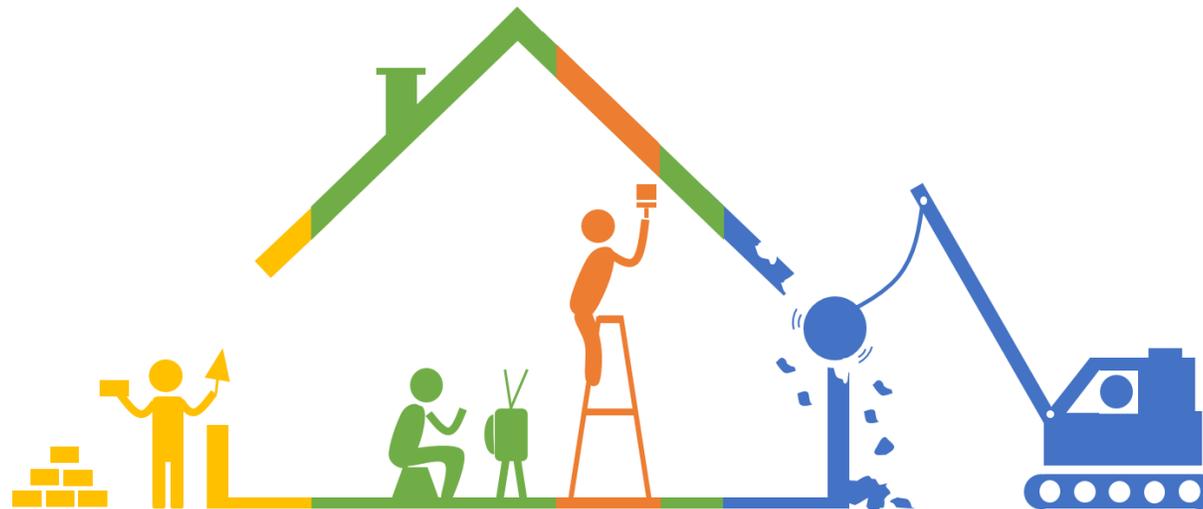
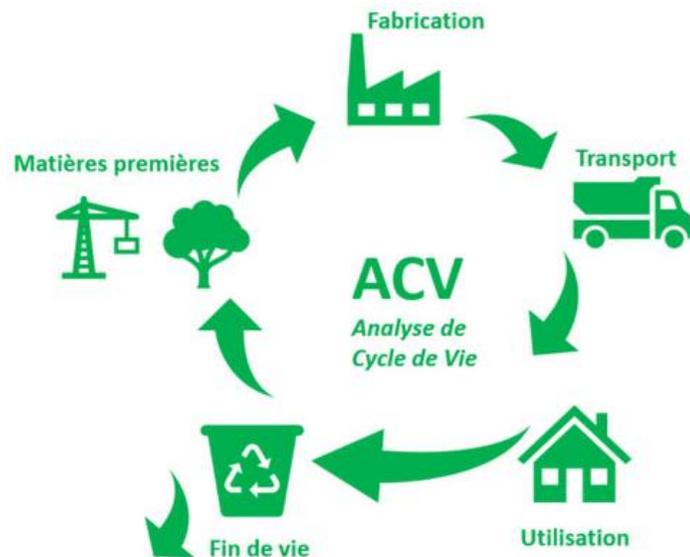
- Forte consommation énergétique
- Longue durée de vie



Réduire les consommations



Eviter le déplacement de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre



Contexte et enjeux

La contribution du secteur du bâtiment :

Sources : United Nations Environment Program, 2022 ; ADEME, 2023 ; SOeS 2016

40%

- De la consommation énergétique finale mondiale
- Des émissions de CO₂

50%

- Des matières premières en France proviennent du BTP

2/3

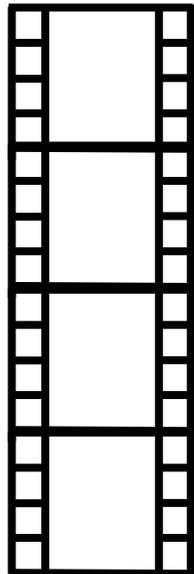
- Des déchets en France (BTP)

26%

- De la consommation nette d'eau pour l'eau potable en France

- Emissions de polluants (air, eau, sol) avec effet sur la santé et la biodiversité

→ Nécessité d'une démarche multicritère et multi-étape : l'écoconception

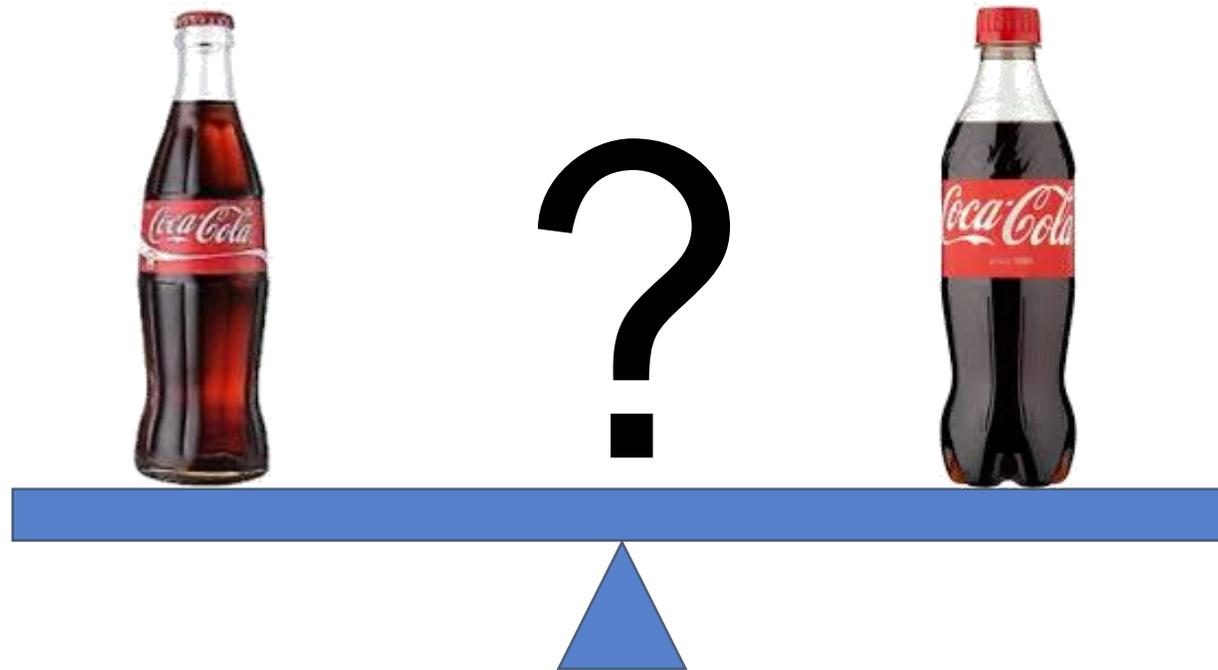


Historique

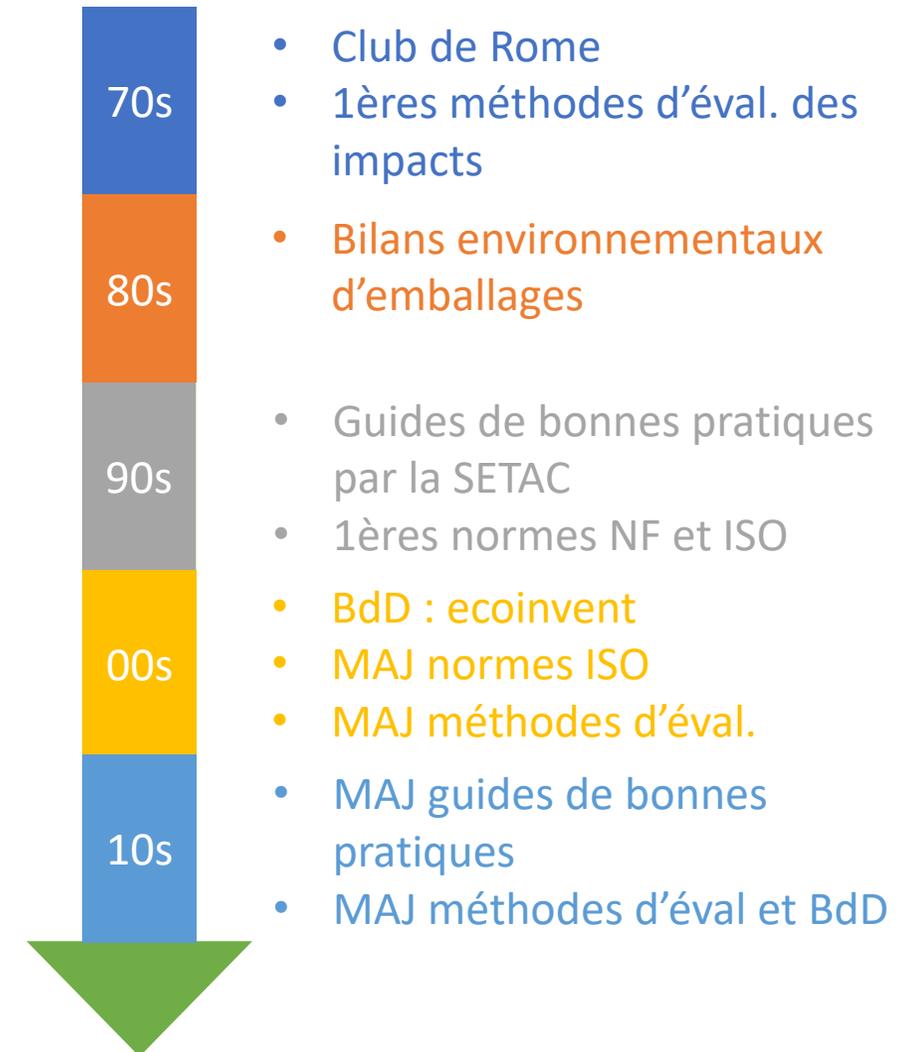
Les premières études environnementales

Développement après les chocs pétroliers et les catastrophes environnementales des années 70

- Emballage de boissons



Sources : Harry E. Teastley Jr. (1969) ; Darnay, A., et Nuss, G. (1971)



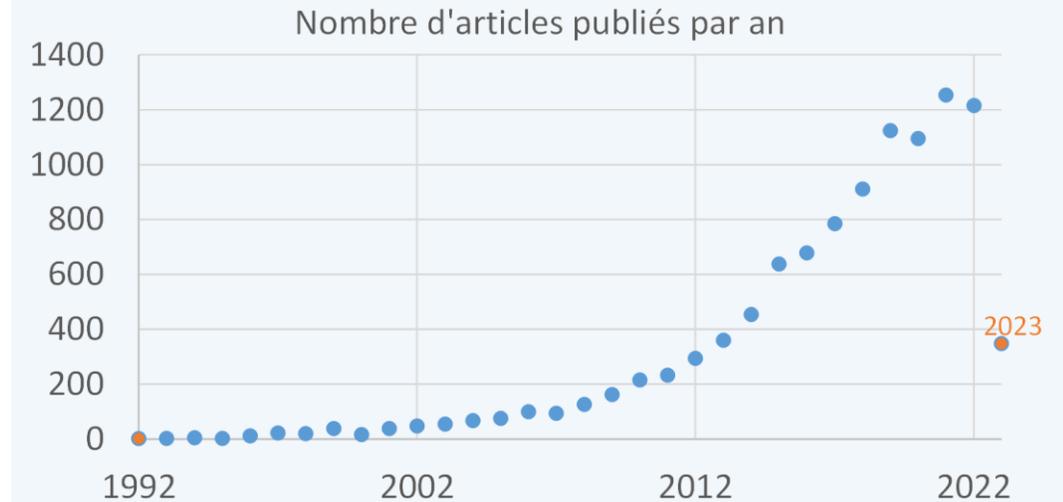
Études environnementales appliquées aux bâtiments

Énergie consommée dans les bâtiments (RT 1974)

Approche ACV

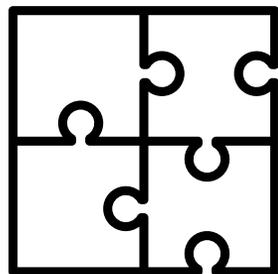
- Depuis: 1985-1990 (bâtiment)
2000-2005 (quartier)
- Normes : NF P01-010 (2004) -> NF EN 15 804 (2012)
NF P01-020 (2005) -> NF EN 15 978 (2012)
- Certifications : BREEAM (1990), LEED (1998),
HQE (2004), DGNB (2007)
- Réglementation : RE 2020

Source : WoS, Mots-clés « Building life cycle assessment »



Revue :

1. *Journal of Cleaner Production*
2. *Sustainability*
3. *International Journal of LCA*
4. *Energy and Buildings*
5. *Building and Environment*



Méthodologie

Définitions

Principe de l'ACV

Les étapes de l'ACV

Définitions

Écoconception

Prendre en compte les aspects environnementaux dès la phase de conception pour réduire les impacts du cycle de vie

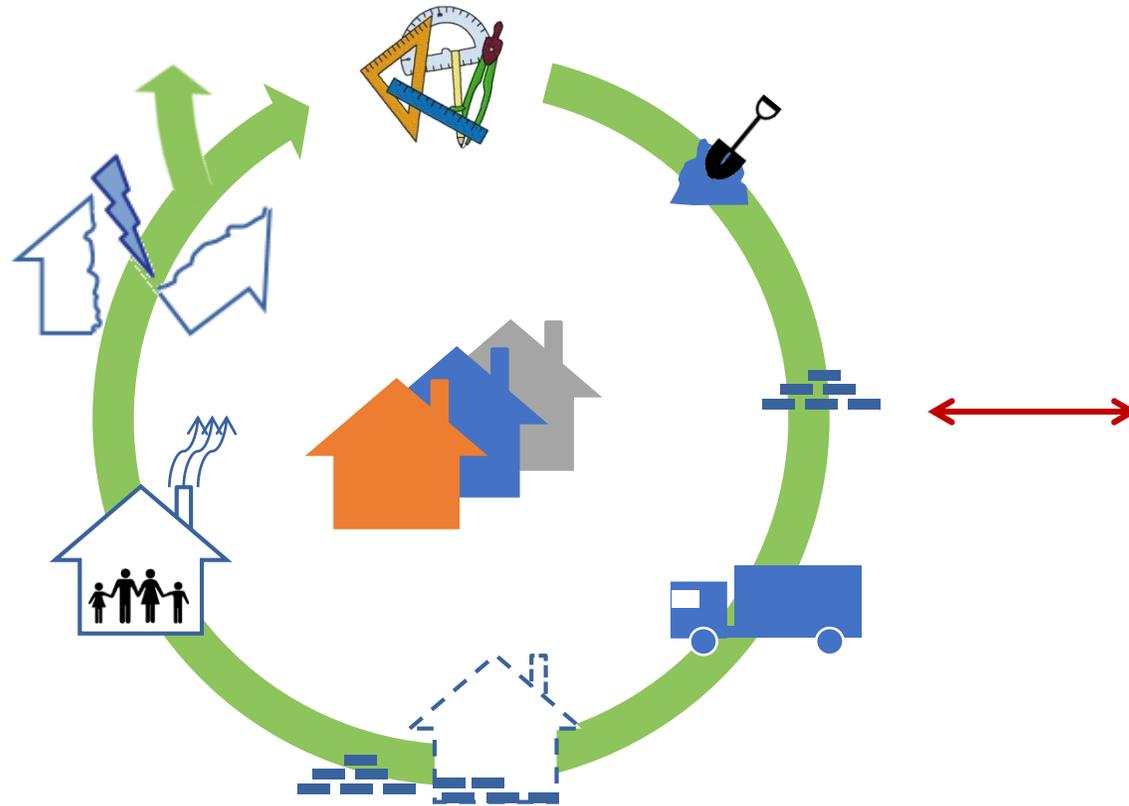
Étude d'impact

Etude technique visant à limiter les conséquences négatives d'un projet établi (ex. implémentation d'une usine)

Analyse de cycle de vie

Méthodologie évaluant les impacts environnementaux d'un projet sur l'ensemble de son cycle de vie

Principe de l'ACV



Problèmes ou dommages :

- Climat
- Ressources (eau, énergie...)
- Santé humaine
- Écosystèmes
- ...

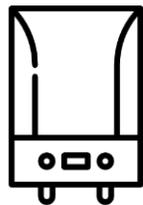
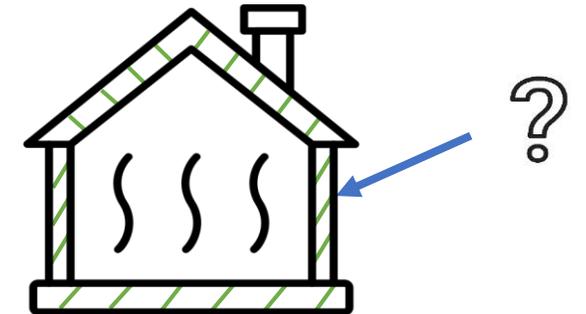
Berceau au tombeau /
Berceau au berceau

Principe de l'ACV

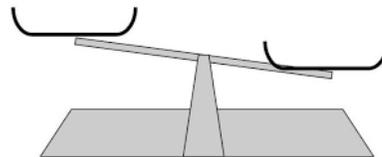
L'ACV, une méthode multi-étape et multicritère adaptée au secteur du bâtiment

Éviter le déplacement de pollution

- D'une étape du cycle de vie à une autre
- D'un problème environnemental vers un autre



Emissions de gaz à effet de serre



Occupation des sols → Biodiversité
Impact sur la santé humaine

Principe de l'ACV

L'ACV est :

- Un outil d'aide à la décision multicritère
- Du berceau au tombeau
- Un lien entre la fonction d'un produit et son impact environnemental

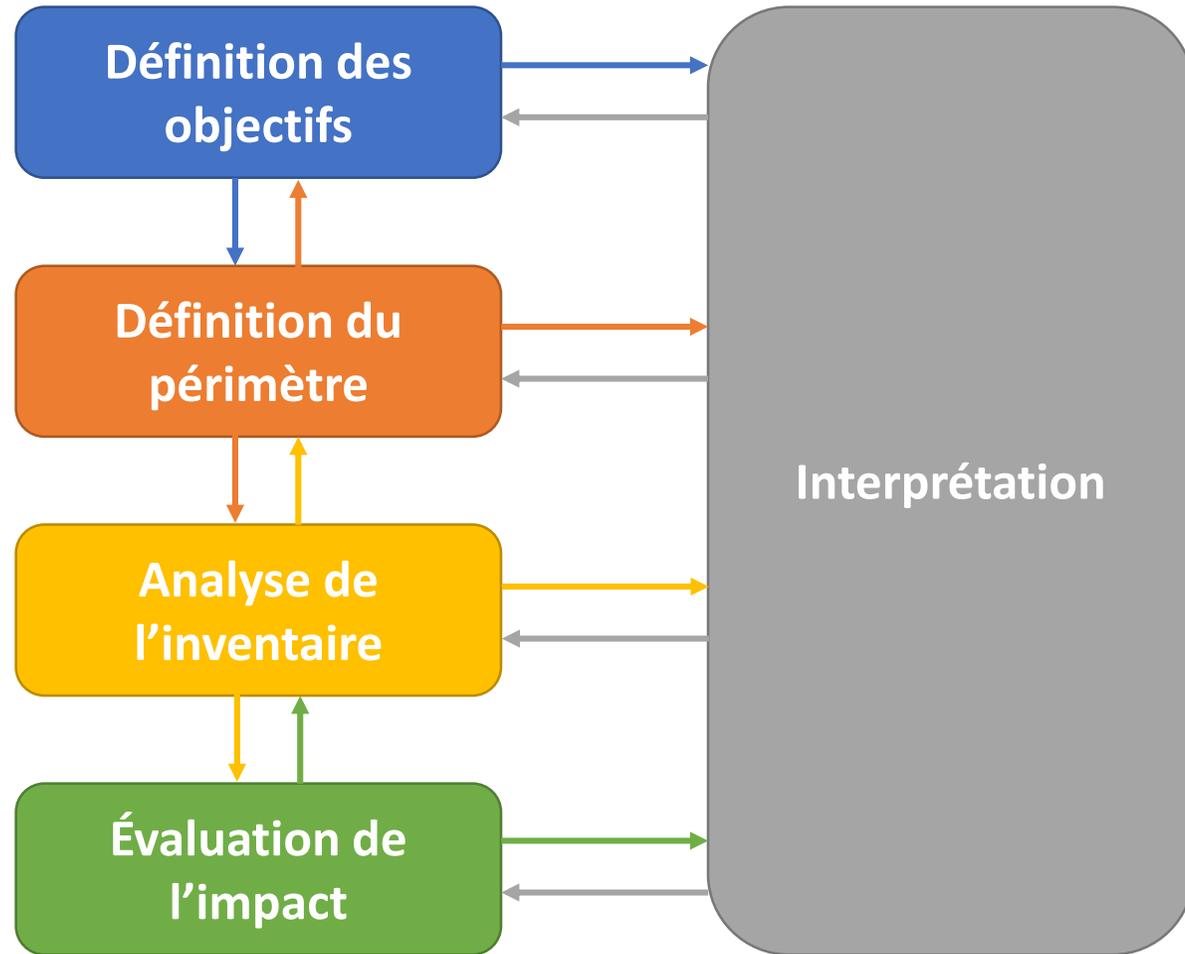
L'ACV n'est pas :

- Un bilan carbone (changement climatique uniquement)
- Une étude d'impact (pour un site donné, sans considérer le cycle de vie complet)
- Une analyse de risques (dépassement de seuils de concentration en polluants ?)

- Climat
- Ressources (eau, énergie...)
- Santé humaine
- Écosystèmes
- ...



Les étapes de l'ACV



Adapté de l'ILCD Handbook, 2011

Définition de l'objectif

Choix du site, aide à la programmation (niveaux de performance), aide à la conception (comparaison de variantes architecturales), aide à la réalisation (comparaison de produits), fin de vie ...

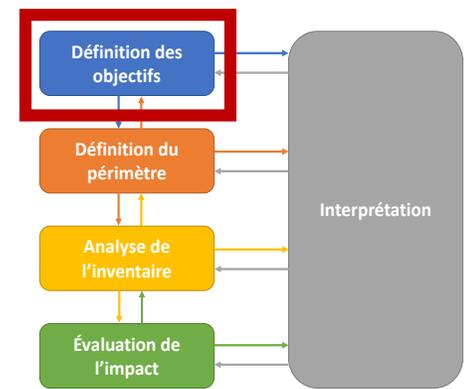
Unité fonctionnelle

« Représente une quantification de la fonction d'un produit »

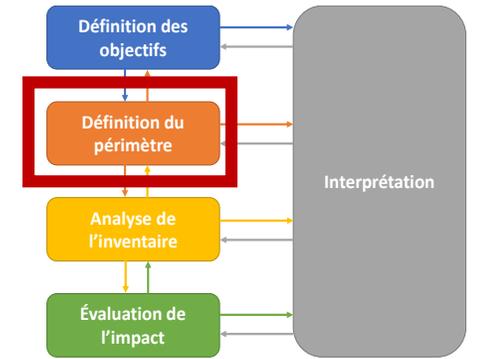
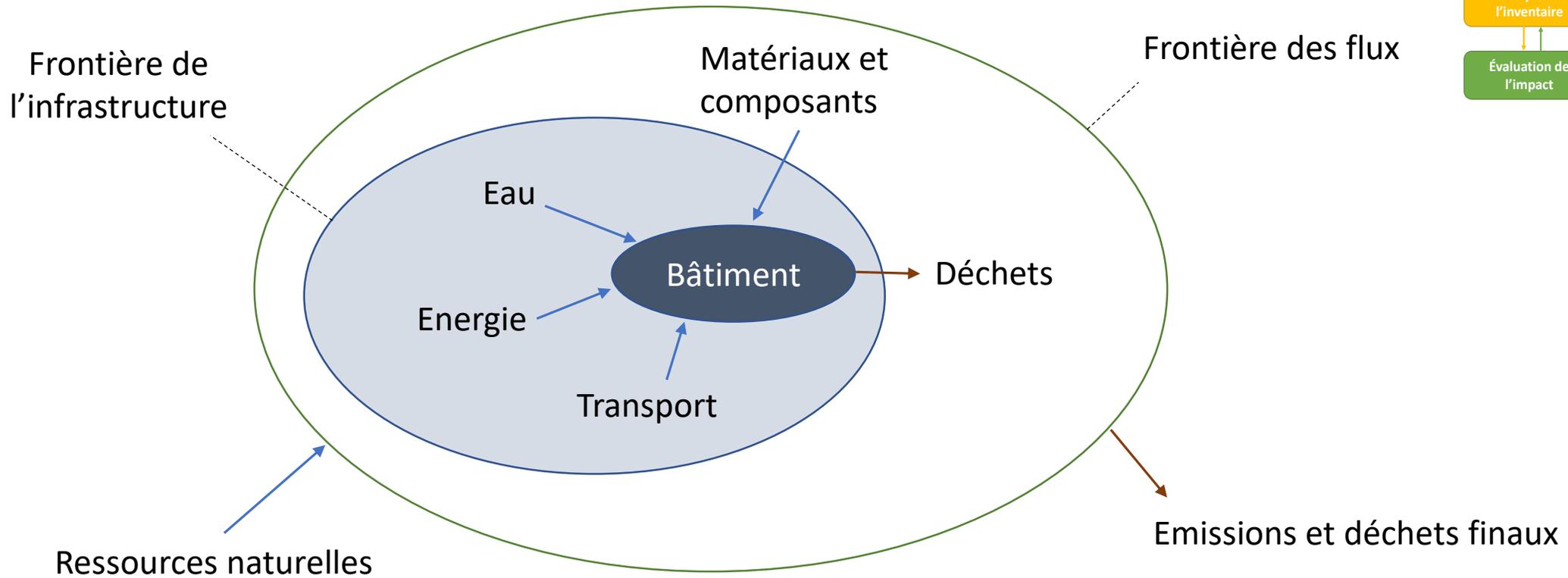
Elle doit contenir une composante fonctionnelle, un critère de performance et une durée



- Fonction : loger une famille de 4 personnes
- Unité : m² de surface habitable
- Quantité : 1 m²
- Qualité de la fonction : ex. confortable, 20°C à 26°C, clair, calme, ventilé, sain
- Durée : 1 an



Définition des frontières du système

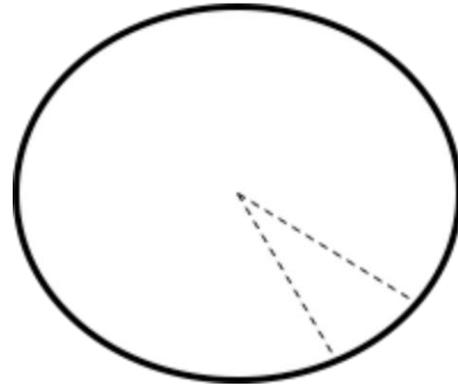


- Adaptation des frontières aux objectifs de l'étude



Choix de l'approche ACV

ACV attributionnelle



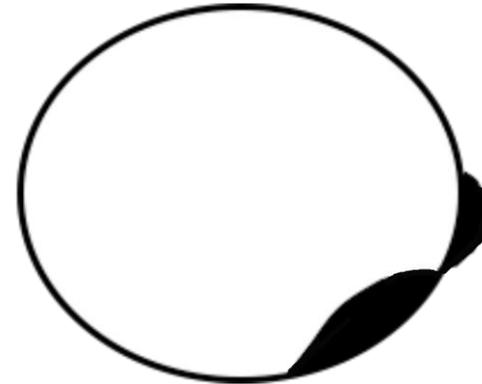
Ensemble des impacts environnementaux associés au système étudié à un instant donné



Certification



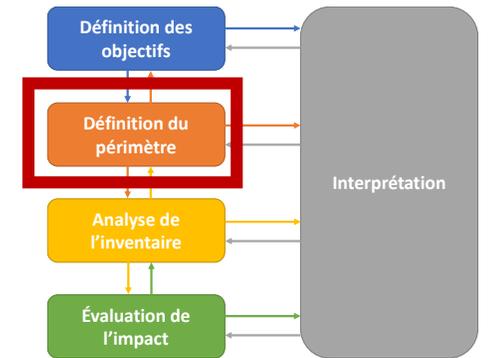
ACV conséquentielle



Conséquences de la décision correspondant à la réalisation du projet (Weidema et al., 2009). Mise en évidence du lien entre le projet et le contexte économique et infrastructurel (Roux, 2016)



Conception, aide à la décision

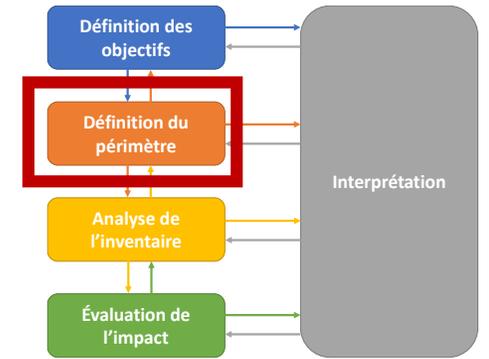


Source : <https://consequential-lca.org/clca/why-and-when/>

Définition des hypothèses

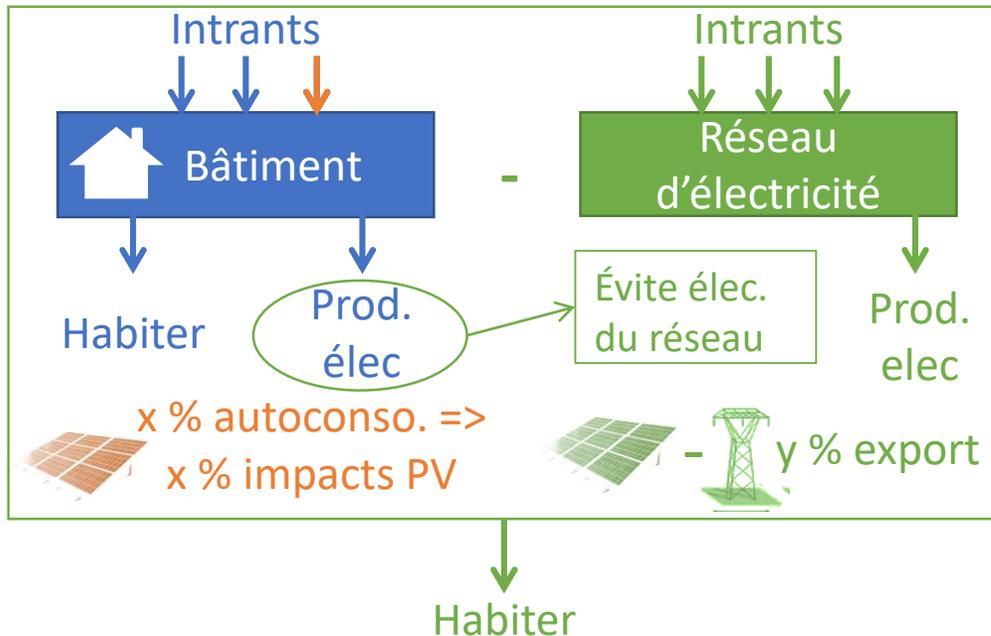
Allocation des impacts

Pour aller plus loin: Schrijvers et al., 2016



Pourquoi ?

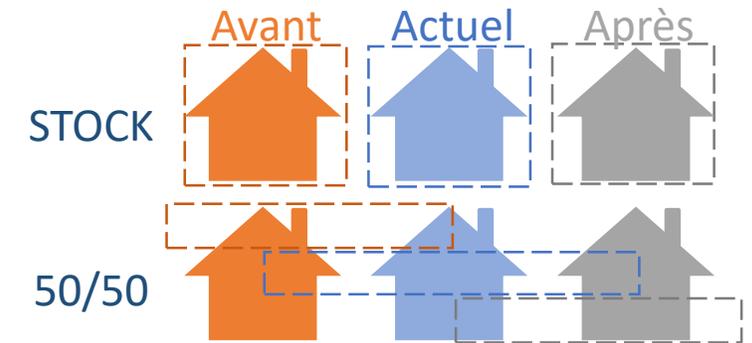
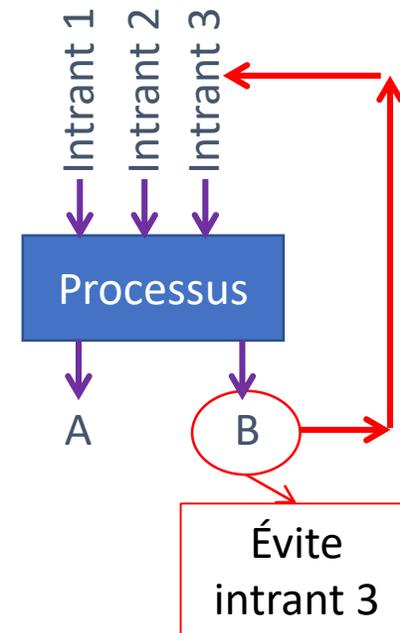
- **Multifonctionnalité**
expl : bâtiment producteur d'électricité



Stocks : allocation physique (masse, énergie, ...)
Impacts évités: substitution, expansion du système

Pourquoi ?

- **Recyclage – Réemploi**
expl : à qui allouer les bénéfices environnementaux ?



Calcul de l'inventaire

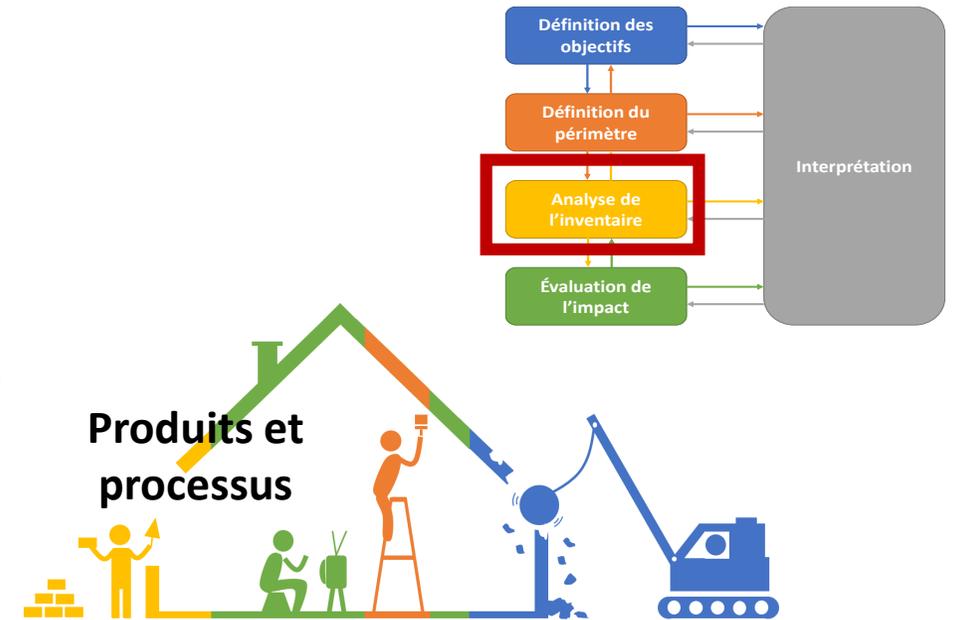
Quels sont les impacts de mon bâtiment ? Ex : kg Substance / UF ?

Unité Fonctionnelle (UF) : x kg béton + y MJ + z kg eau + ...

Quantité de substances par unité fonctionnelle : kg C₂H₄ eq / UF ?

- kg C₂H₄ eq / x kg béton ?
- kg C₂H₄ eq / y MJ ?
- kg C₂H₄ eq / z kg eau ?

Émissions directes & émissions indirectes !

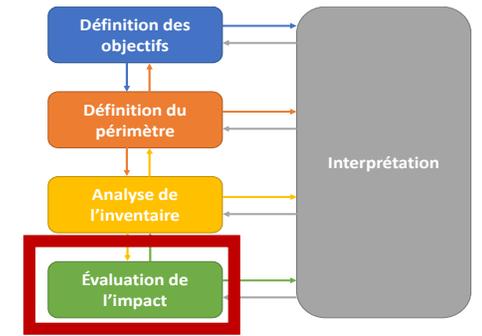
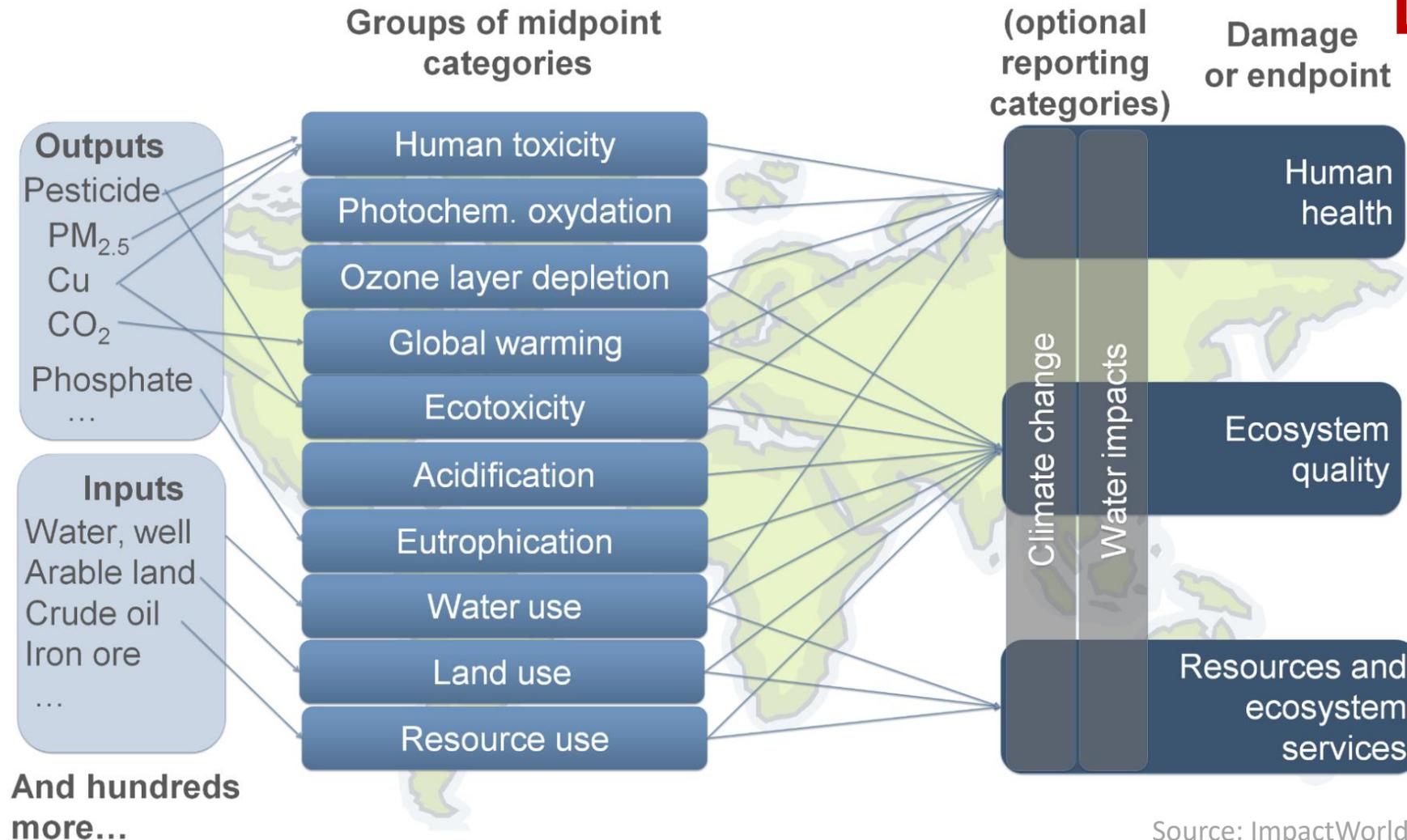


Inventaire de toutes les substances émises et extraites de l'environnement

Bases de données environnementales !

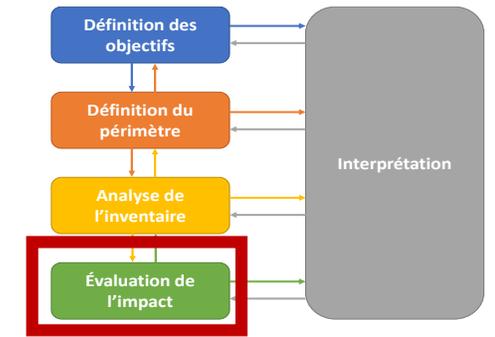
Evaluation de l'impact

Agrégation en thèmes environnementaux



Evaluation de l'impact

Agrégation en thèmes environnementaux



Nombreuses méthodes de calcul des impacts : ReCiPe, ImpactWorld+, AWARE, USEtox, CML, ...

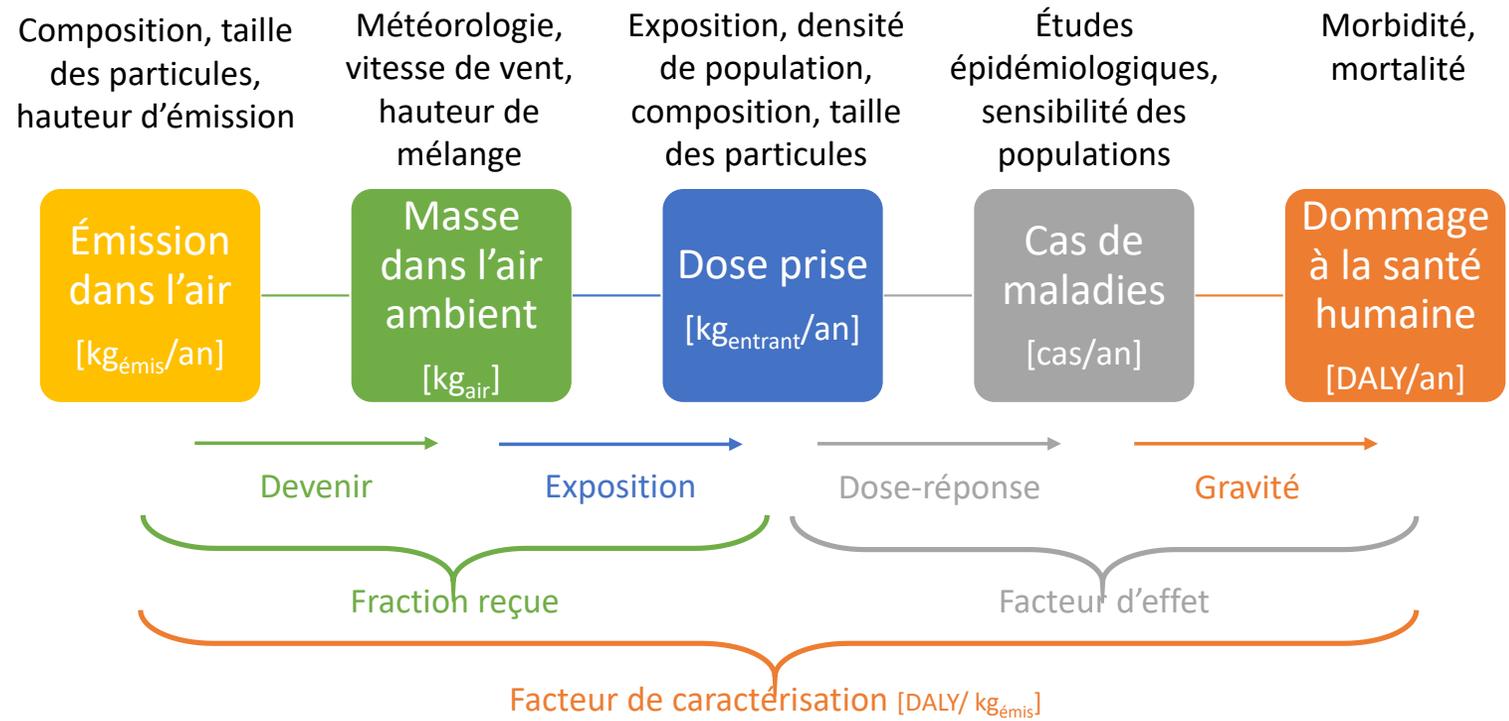
Méthodes les plus récentes :
persistance des émissions et du devenir
des polluants



Substances non répertoriées ; Pas d'interactions entre substances



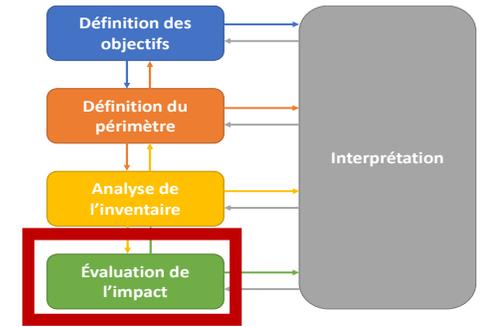
**Norme d'ACV des bâtiments :
indicateurs des NF EN 15 804 et 15 978**



Exemple pour les particules fines, adapté de Humbert et al, 2011

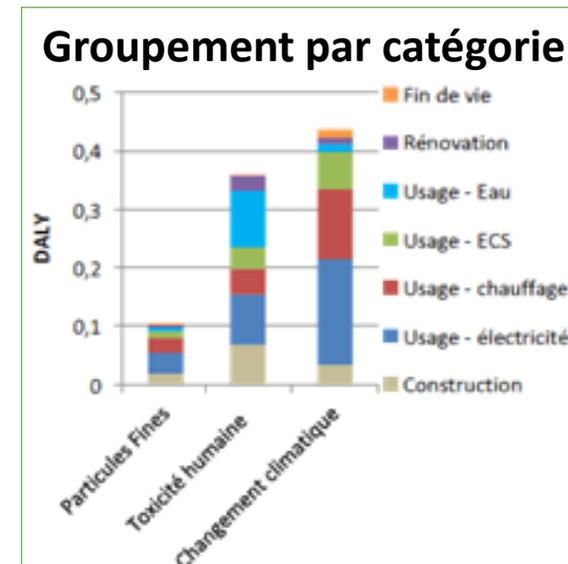
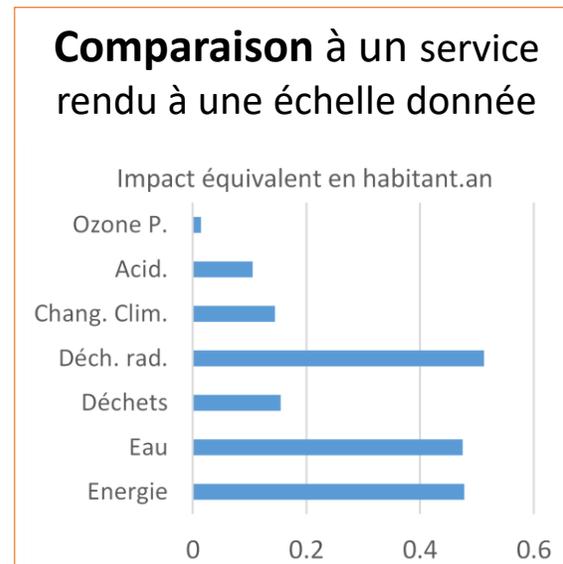
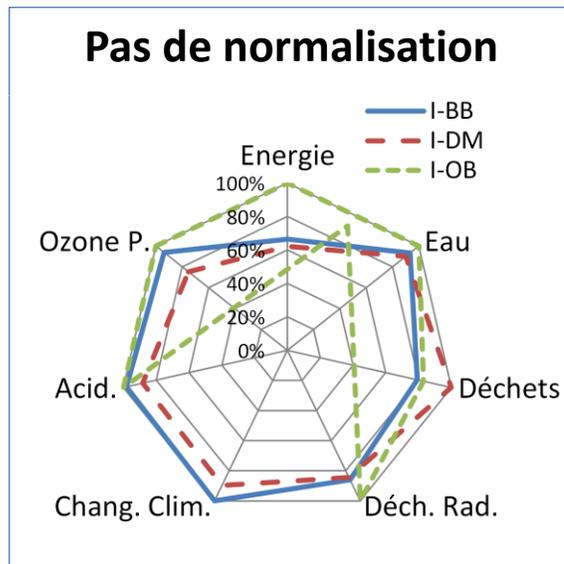
Normalisation et pondération

(Etapes facultatives)



Pourquoi ?

- À quoi comparer la contribution de mon bâtiment ?
- Indicateurs dans différentes unités : changement climatique (kg CO₂-eq), acidification (kg SO₂-eq), ...
 - Sur quelle thématique environnementale agir en priorité pour réduire une catégorie de dommage, ou tous les dommages causés à l'environnement ?



Pondération

Agrégation (physique, monétaire, ...) en un indicateur unique

Interprétation des résultats

Pourquoi ?

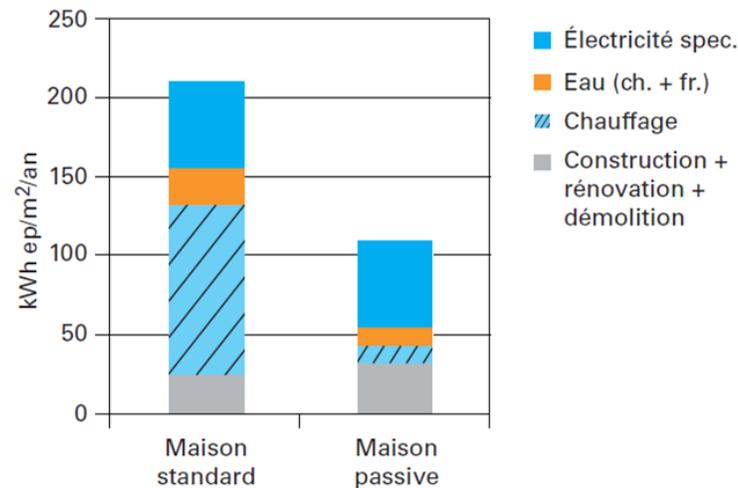
- Contrôler : résultats & atteinte des objectifs
- Identifier les processus contribuant le plus aux impacts
- Mettre en avant les limites
- Fournir des recommandations, conclusions



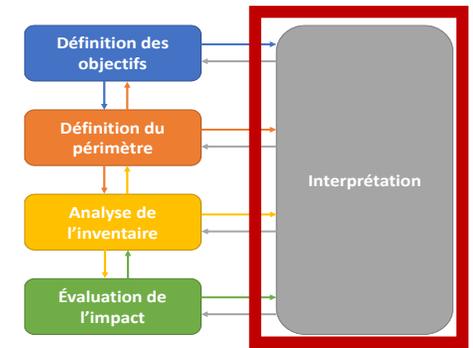
ACV = processus itératif : Vérification au fur et à mesure de la pertinence et de l'effet des hypothèses

Comment ?

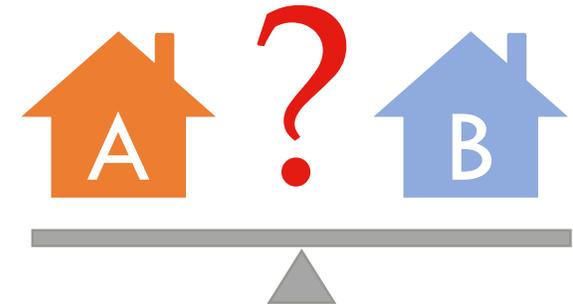
- Analyses de sensibilité, d'incertitudes, de scénarios, ...



Source: Peuportier, 2014



ACV : aide à la décision



A meilleur que B ?

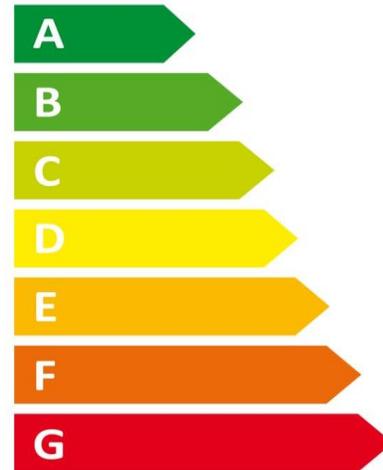
- Légèrement ou significativement ?
- Pour tous les indicateurs ?
- Toujours vrai si on change des hypothèses ?
- ...

Comparaisons environnementales

Comparaison aux pires et aux meilleures pratiques

Positionnement par rapport à une étiquette environnementale

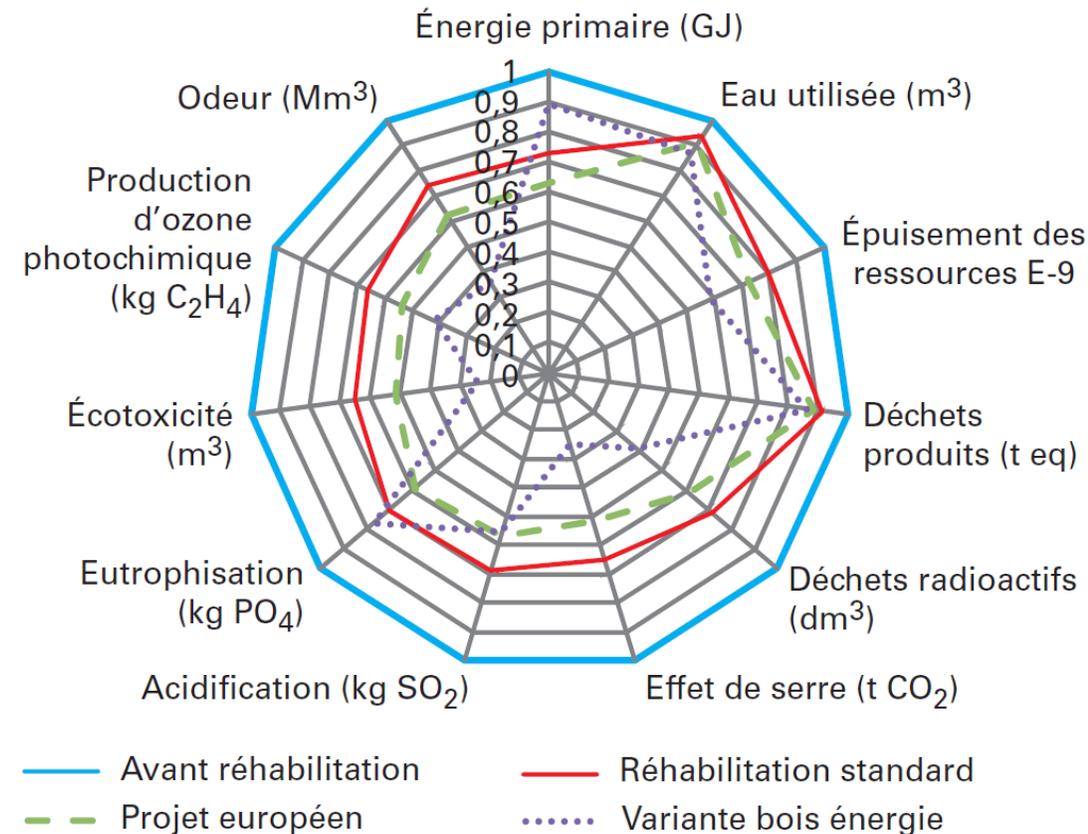
- CO2
- Dommages à la santé
- Dommages à la biodiversité
- ...



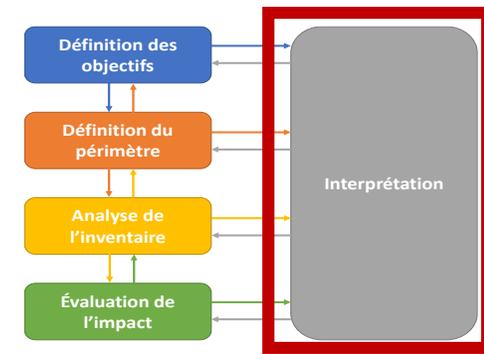
Source : Grabowska et al., 2021

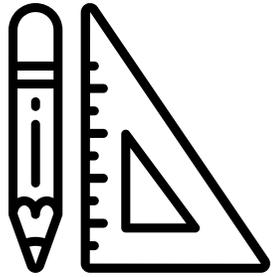
Comparaison environnementale des variantes par rapport à une référence

Exemple d'un projet de réhabilitation d'un immeuble de logements sociaux :



Source : Peuportier, 2014





Outils

Outil d'ACV généraliste

Exemple : Brightway2



→ ***Open source framework for life cycle assessment calculation***

→ Développé par Chris Mutel depuis 2011

→ Flexibilité : bases de données, méthodes d'évaluation des impacts, création du modèle, allocation, normalisation, pondération

Possibilités :

- Analyse de contribution
- Analyse de sensibilité et d'incertitudes
- Régionalisation des impacts
- ...



Interface

- Saisie et recherche simplifiées

Bases de données

Base ecoinvent (bâtiment, transport, énergie, eau, déchets...)

- Données génériques
- Inventaires complets
- International, contextualisation
- Séparation des étapes (fabrication, transport, fin de vie...)
- Calcul matriciel (interactions entre secteurs, homogène, actualisation)



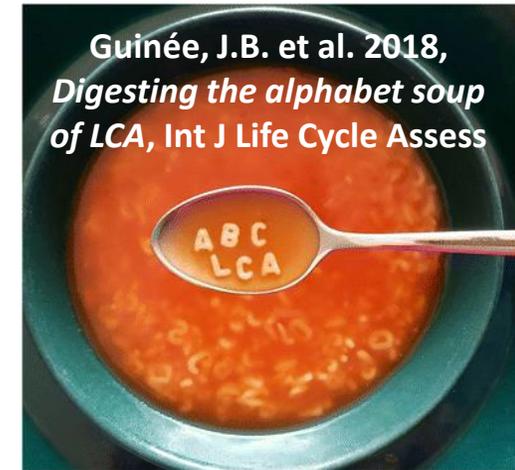
Problématiques de recherche

(Indicateurs environnementaux)

Incertitudes, fiabilité, robustesse

ACV Dynamique, Prospective, Spatialisée,
Conséquentielle, Attributionnelle, ...

ALCA BLCA
CLCA DLCA
ILCA NLCA
PLCA SLCA



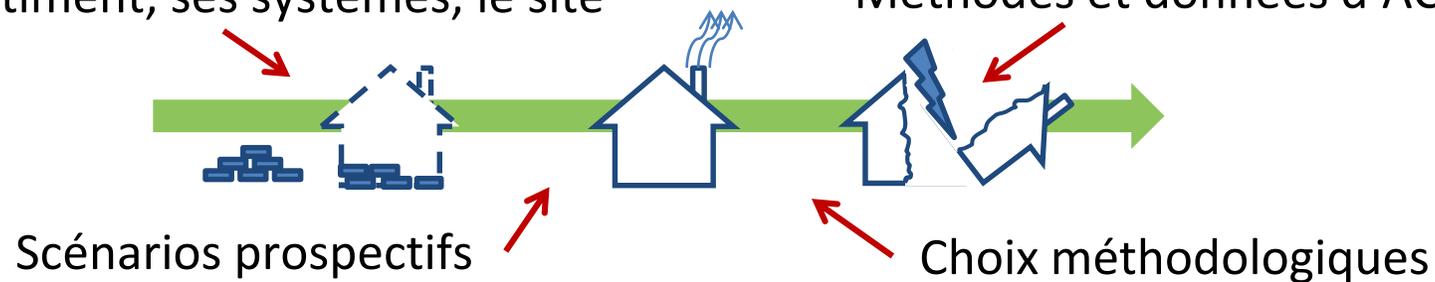
Fiabilité des ACV et prise en compte des incertitudes

ACV pour aider à la décision :

- Outils fiables et robustes nécessaires

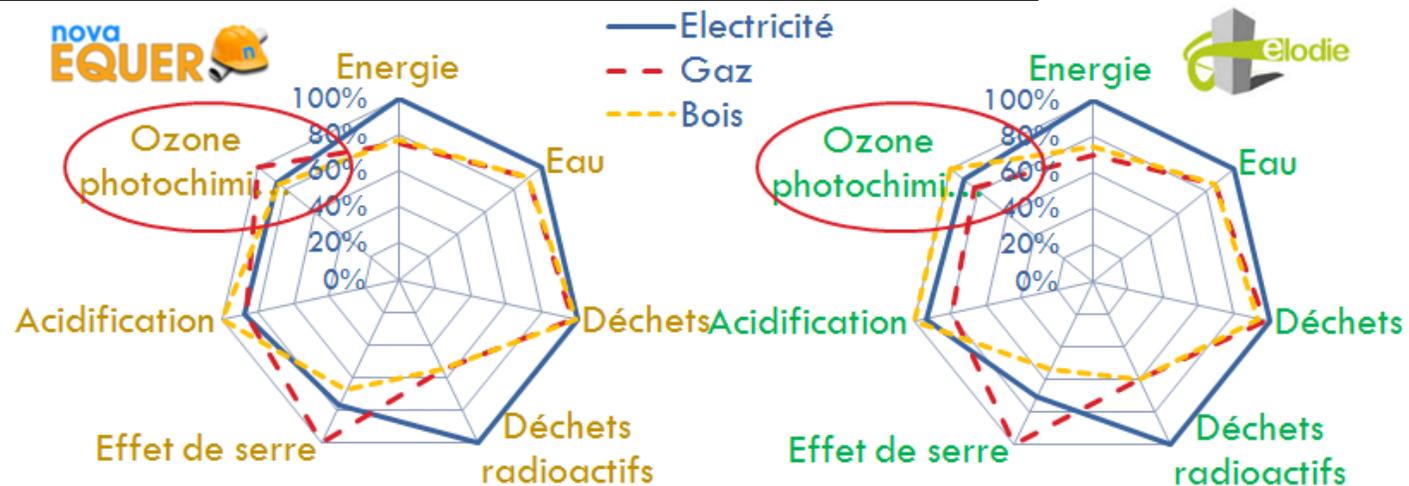
Hypothèses sur le bâtiment, ses systèmes, le site

Méthodes et données d'ACV



Incertitudes

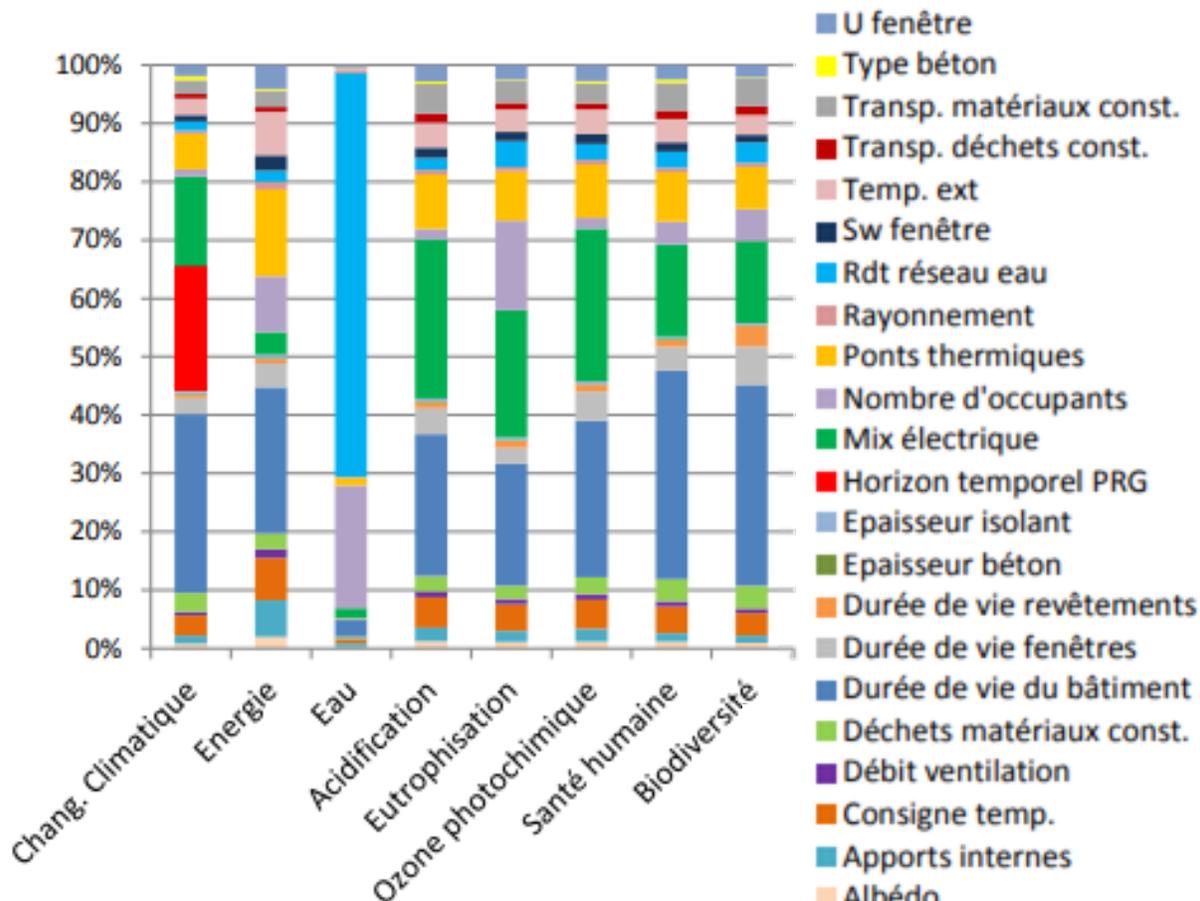
- Mêmes résultats si une étude est menée avec deux outils ?



Fiabilité des ACV et prise en compte des incertitudes

ACV pour aider à la décision :

- Analyse de sensibilité
Facteurs les plus influents

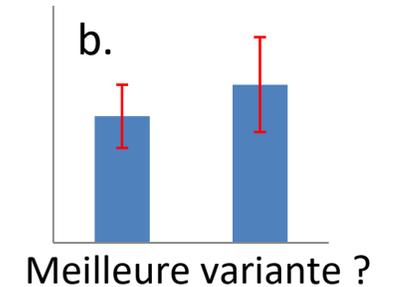
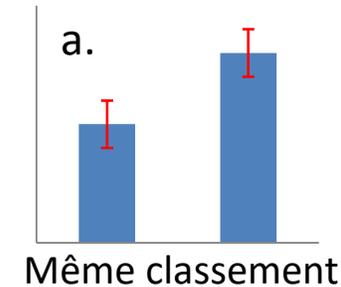


Source: Pannier et al. 2018

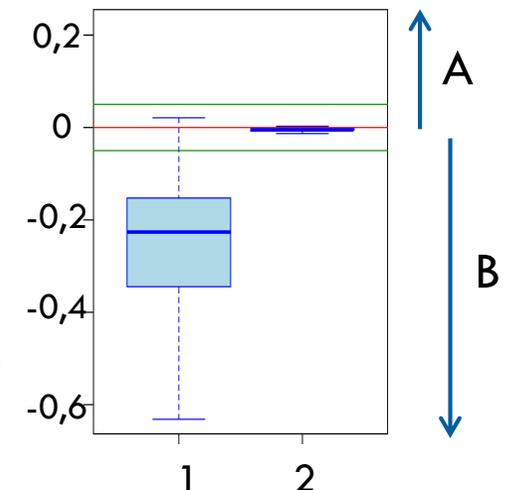
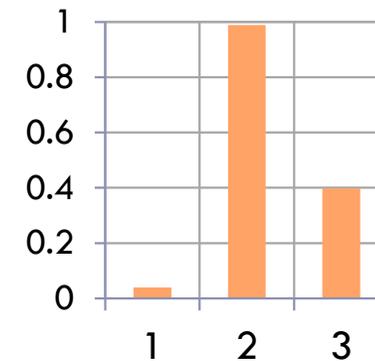
Simurex - IBPSA - 16 mai 2024

- Analyse d'incertitudes

Les incertitudes remettent-elles en cause la comparaison de variantes ?



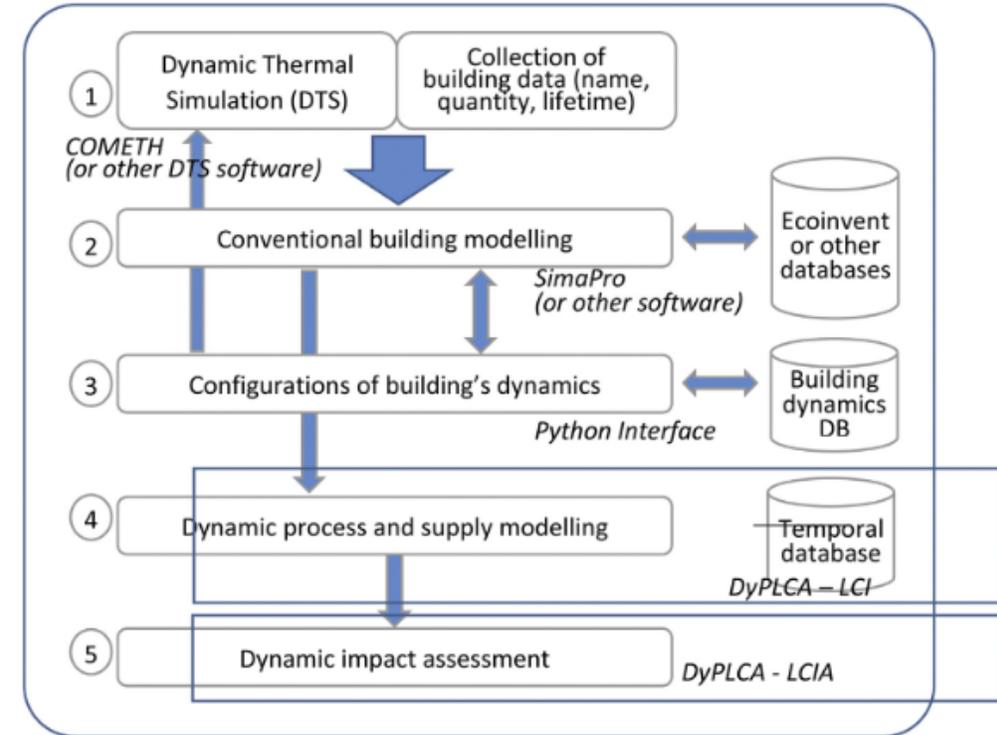
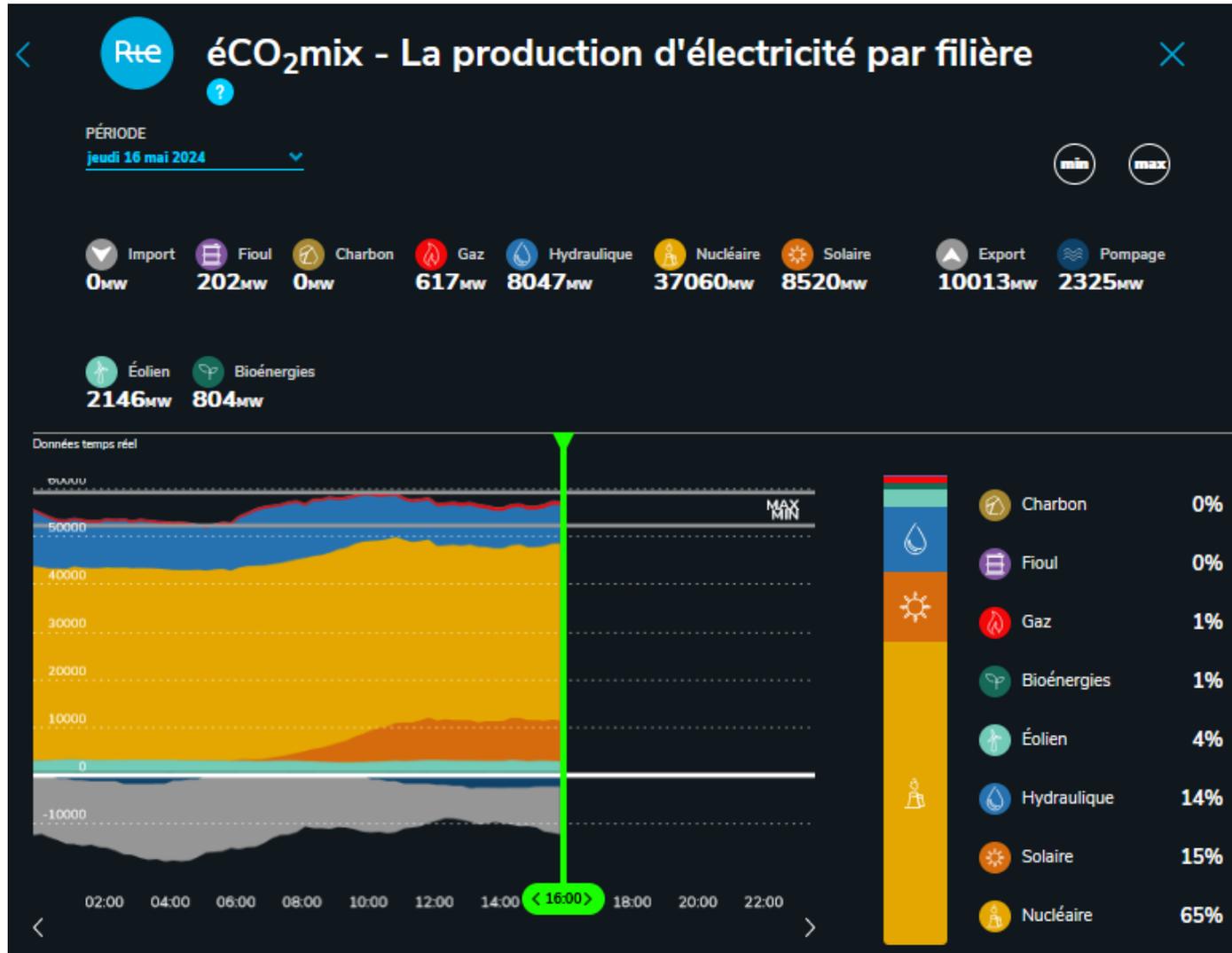
Comparaison par paires



Source: Pannier et al. 2023

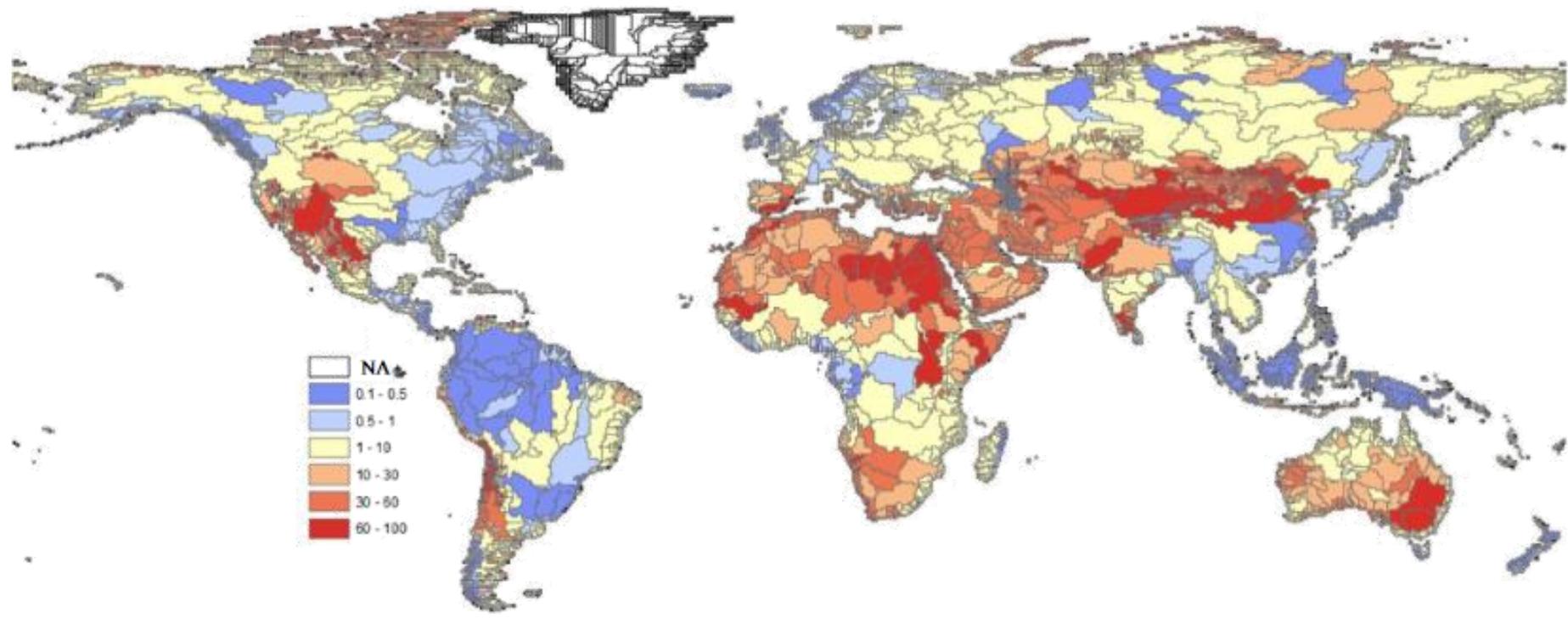
33

ACV dynamique



Source: Negishi et al., 2018

Spatialisation en ACV

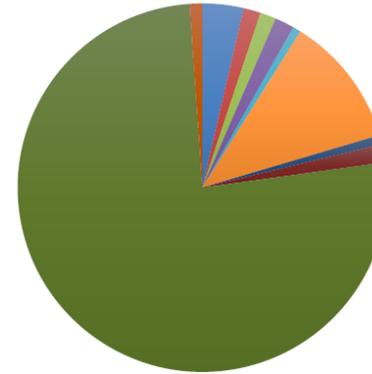


Source: Boulay et al., 2018

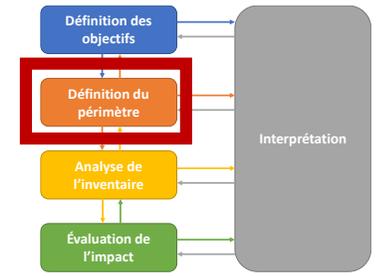
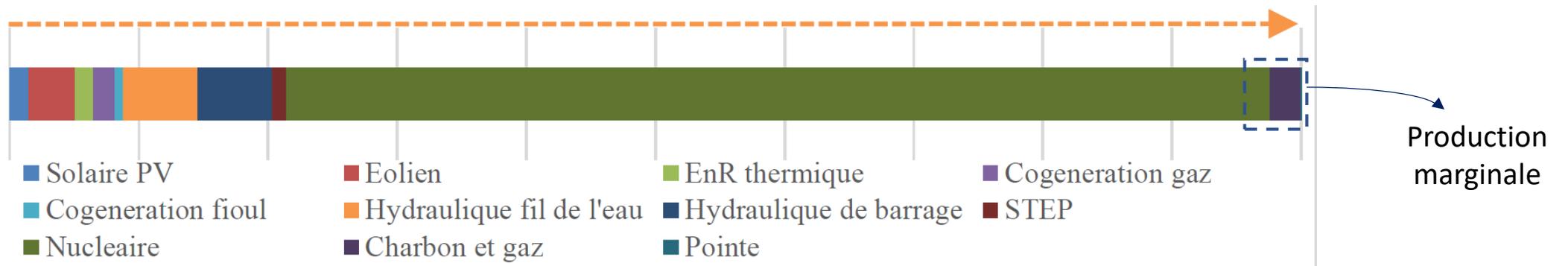
Choix de l'approche ACV

Définition des hypothèses - Énergie

Mix électrique 2016 (D'après Roux, 2016)

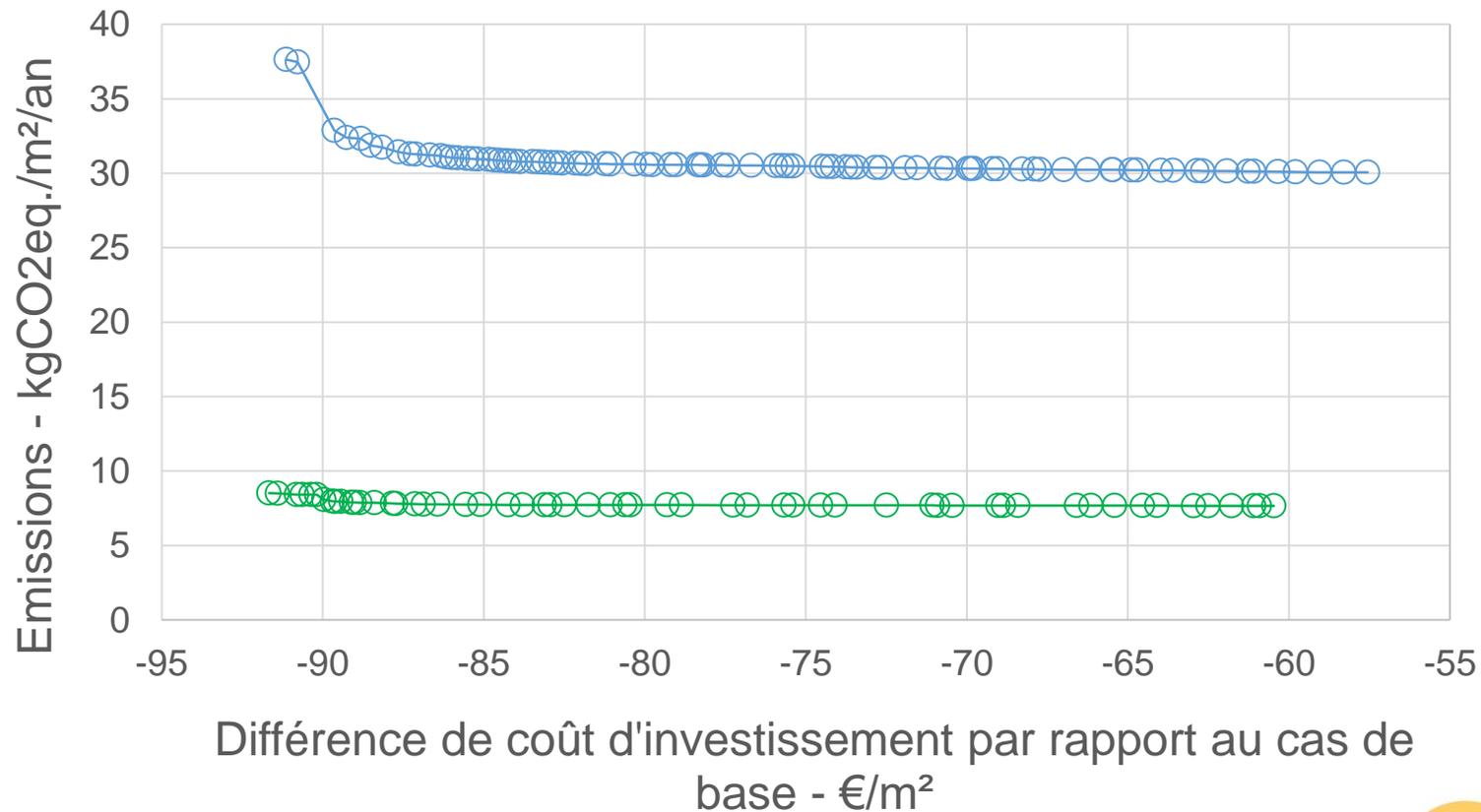


Ordre de sollicitation des technologies : Merit-order (Méthode GHG-Protocol)



Influence de l'approche ACV

Exemple d'un bâtiment de logements collectifs



Choix de l'approche en fonction de l'objectif de l'étude. Ex :

- Conséquentiel en conception
- Attributionnel pour une certification



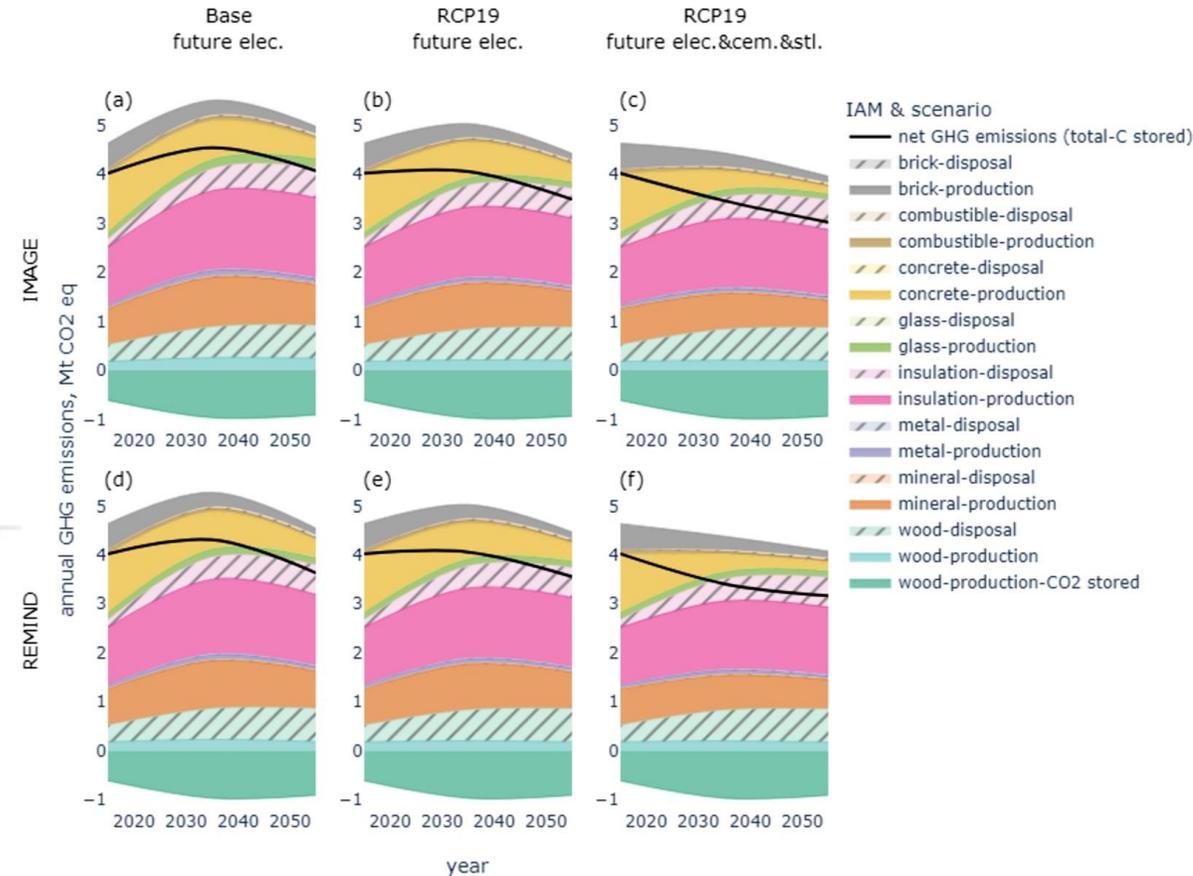
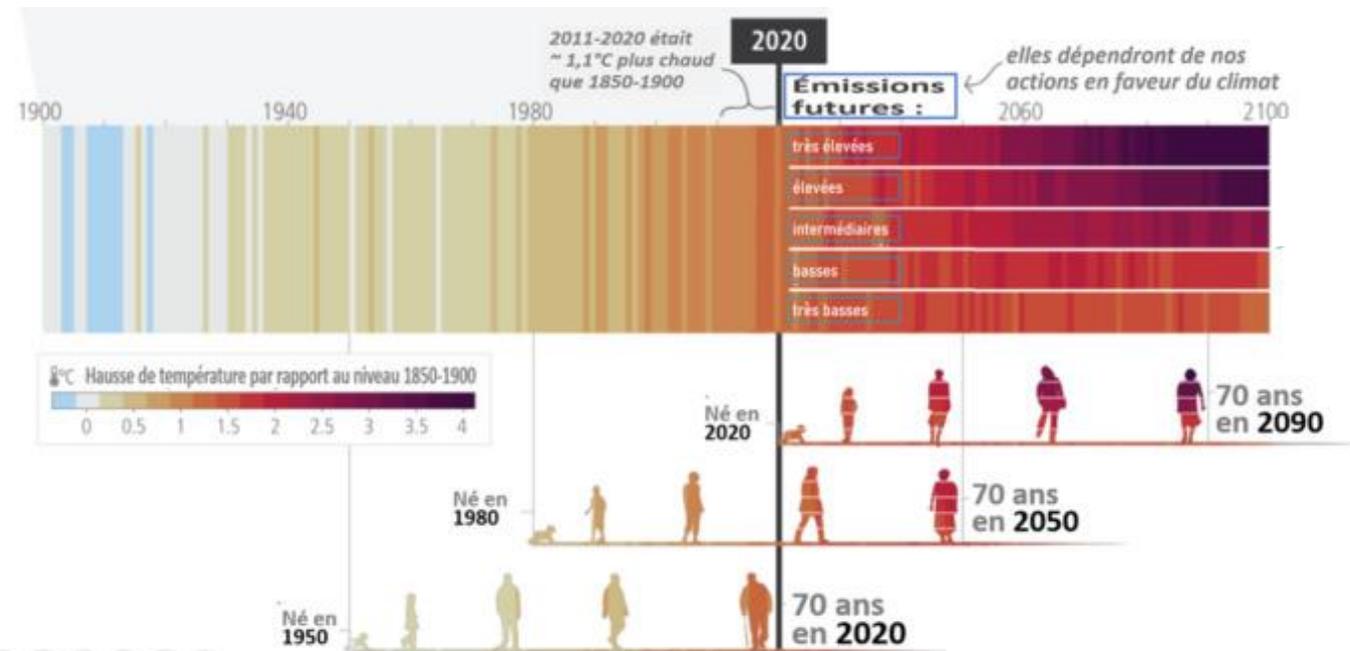
—○— PAC attributionnel 2016 —○— PAC conséquentiel 2016



Evolutions futures – Prospective

Evolution des émissions de GES des matériaux de construction selon les évolutions futures

Evolution des températures entre 1900 et 2100



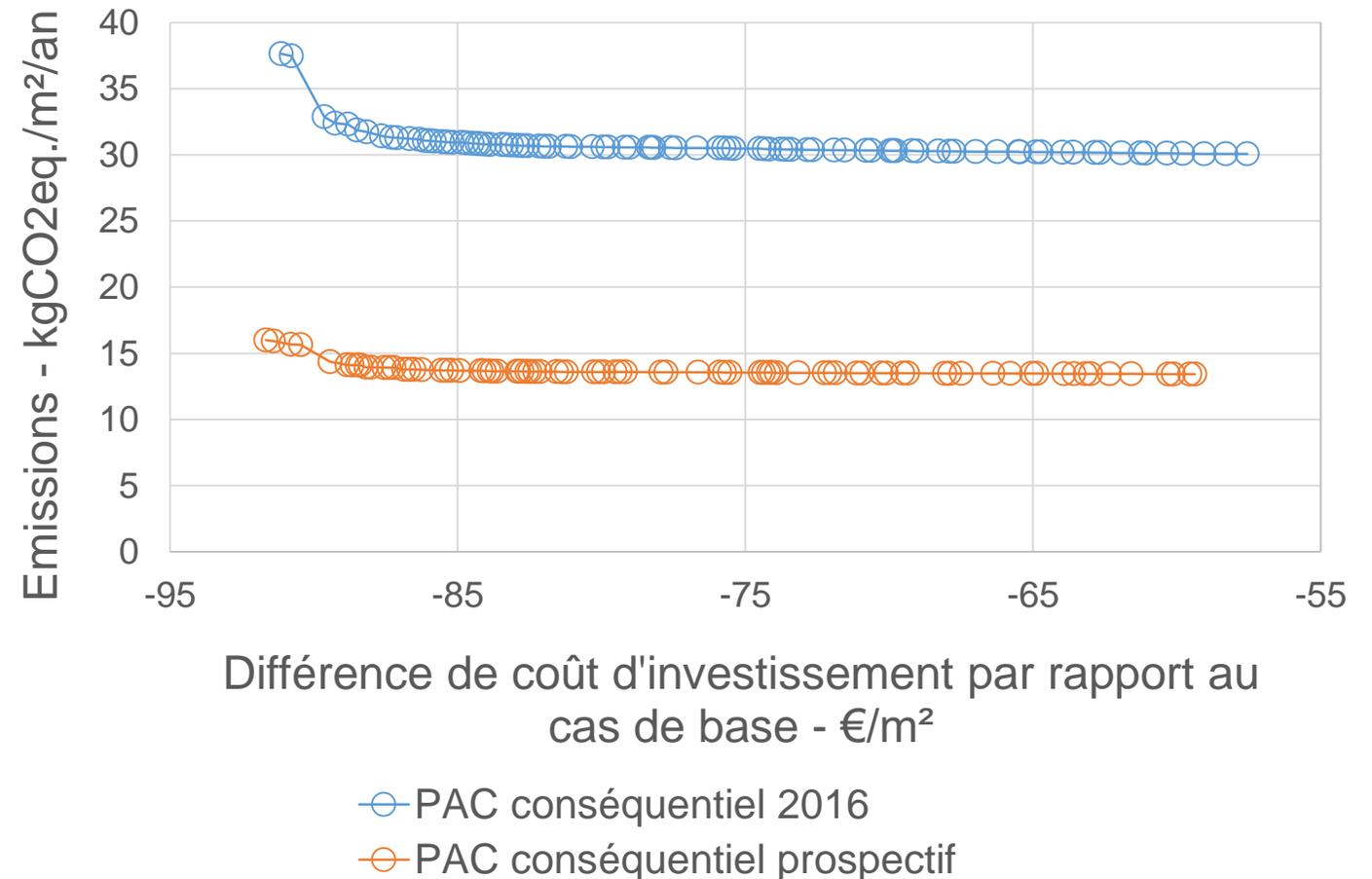
D'après le rapport de synthèse du 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC

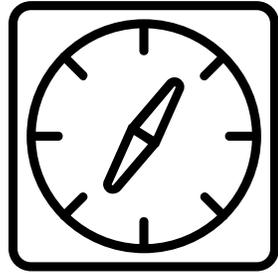
Source : Zhang et al. (2024)

Influence de la prospective

- Évolution de la demande énergétique dans le temps
 - Vieillesse des matériaux et équipements : diminution de la performance ou remplacement
 - Évolution du mix énergétique
- Approche prospective, mise en pratique par l'utilisation de scénarios (scénarios d'évolution du mix sur 100 ans par ex.)

Exemple d'un bâtiment de logements collectifs





Conclusions & Perspectives

Pour finir

L'analyse de cycle de vie des bâtiments ...

... une méthode holistique pour évaluer les impacts environnementaux des ensembles bâtis sur tout leur cycle de vie ...

... en plein essor et avec de nombreuses perspectives

Pour finir

Ressources et formations doctorales sur l'ACV

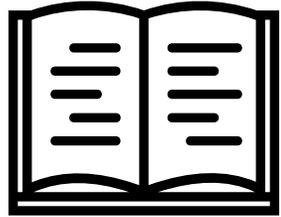
- **Ouvrage :**
 - Joliet et al. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. ISBN: 9782889151356
- **Conférences :**
 - *SBE / WSBE : depuis 2000*
 - *LCM : depuis 2001*
 - *SETAC conferences (SETAC depuis 1979)*
- **Cours ACV / Écoconception :**
 - *Réseau (fr) ECO-SD (5 formations doctorales)*
 - *Ecoles scientifiques Départ de Sentier*

Notre atelier commence dans 15 minutes, venez y assister pour aller plus loin !

Vers un groupe IBPSA-ACV ?

- Premier atelier en 2023
- Idée : Rencontres annuelles / bi-annuelles de la communauté ACV bâtiments
- Faites nous part des sujets dont vous souhaiteriez discuter !





Bibliographie

- United Nations Environment Programme (2022). 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi.
- SOeS. 2016. Onema, Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE).
- ADEME. 2023. Déchets Chiffres-clés – Edition 2023. Référence 011982. 84p.
<https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6108-dechets-chiffres-cles-edition-2023.html>.
- Harry E. Teastley Jr. (1969) : étude jamais été publiée en intégralité, seul un résumé 1976, dans *Science Magazine*
- Darnay, Arsen, et Gary Nuss. 1971. « Environmental impacts of Coca-Cola beverage containers ». Midwest Research Institute for Coca-Cola USA.
- AFNOR NF EN 15804. 2014. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Norme, issued 2014.
- European Standards. 2011. EN 15978. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, issued 2011.
<https://viewer.afnor.org/Pdf/Viewer/?token=LdcAcCLhGfY1>.

- EC-JRC. 2010a. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Assessment Models and Indicators ». EUR 24586 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>.
- EC-JRC. 2010b. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance. First Edition March 2010 ». EUR 24708 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>.
- EC-JRC. 2011. « International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context - Based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors ». EUR 24571 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>.
- Blog sur l'ACV conséquentiel : <https://consequential-lca.org/clca/why-and-when/>

- Schrijvers, Dieuwertje L., Philippe Loubet, et Guido Sonnemann. 2016. « Developing a Systematic Framework for Consistent Allocation in LCA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (7): 976-93. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1063-3>.
- ImpactWorld+ : <https://www.impactworldplus.org/> . Bulle, Cécile, Manuele Margni, Laure Patouillard, Anne-Marie Boulay, Guillaume Bourgault, Vincent De Bruille, Viêt Cao, et al. 2019. « IMPACT World+: A Globally Regionalized Life Cycle Impact Assessment Method ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (9): 1653-74. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>.
- Humbert, Sebastien, Julian D. Marshall, Shanna Shaked, Joseph V. Spadaro, Yurika Nishioka, Philipp Preiss, Thomas E. McKone, Arpad Horvath, et Olivier Jolliet. 2011. « Intake Fraction for Particulate Matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment ». *Environmental Science & Technology* 45 (11): 4808-16. <https://doi.org/10.1021/es103563z>.
- Grabowska, Arleta, Aurore Wurtz, Angélique Ferry, Anatole Truong Nhu, et Bruno Peuportier. 2021. « Valeurs de référence pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments ». Mines ParisTech, CES.
- Peuportier, Bruno. 2014. « Ecoconception des bâtiments et des quartiers ». Techniques de l'ingénieur. Techniques de l'ingénieur.
- Brightway: Mutel, Chris. 2017. « Brightway: An Open Source Framework for Life Cycle Assessment ». *Journal of Open Source Software* 2 (12): 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>.

- Ecoinvent. <https://ecoinvent.org/> . Weidema, B. P., Bauer, R Hischer, C Mutel, T Nemecek, J Reinhard, CO Vadenbo, et G Wernet. 2013. « Overview and methodology, Data quality guideline for the Ecoinvent database version3, Ecoinvent Report 1(v3), St. Gallen: The ecoinvent Centre ». Rapport méthodologique.
- Guinée, Jeroen B., Stefano Cucurachi, Patrik J.G. Henriksson, et Reinout Heijungs. 2018. « Digesting the Alphabet Soup of LCA ». The International Journal of Life Cycle Assessment 23 (7): 1507-11. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1478-0>.
- Pannier, Marie-Lise. 2014. « Analyse de cycle de vie des maisons passives de la plateforme INCAS ». Rapport de stage. INSA de Strasbourg.
- Pannier, Marie-Lise, Patrick Schalbart, et Bruno Peuportier. 2018. « Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building life cycle assessment ». Journal of Cleaner Production 199 (octobre): 466-80. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.070>.
- Pannier, Marie-Lise, Patrick Schalbart, et Bruno Peuportier.. 2023. « Dealing with Uncertainties in Comparative Building Life Cycle Assessment ». Building and Environment 242 (août): 110543. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110543>.

- Negishi, Koji, Ligia Tiruta-Barna, Nicoleta Schiopu, Alexandra Lebert, et Jacques Chevalier. 2018. « An Operational Methodology for Applying Dynamic Life Cycle Assessment to Buildings ». *Building and Environment* 144 (octobre): 611-21. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.005>.
- Boulay, Anne-Marie, Jane Bare, Lorenzo Benini, Markus Berger, Michael J. Lathuillière, Alessandro Manzardo, Manuele Margni, et al. 2018. « The WULCA Consensus Characterization Model for Water Scarcity Footprints: Assessing Impacts of Water Consumption Based on Available Water Remaining (AWARE) ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23 (2): 368-78. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>.
- ROUX, C., 2016. « Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis ». Thèse de doctorat. MINES ParisTech.
- WURTZ, A., 2022. « Etude d'une procédure d'optimisation environnementale multicritère à l'échelle de l'îlot ». Mines ParisTech, PSL
- Zhang, Xiaojin, Niko Heeren, Christian Bauer, Peter Burgherr, Russell McKenna, et Guillaume Habert. 2024. « The impacts of future sectoral change on the greenhouse gas emissions of construction materials for Swiss residential buildings ». *Energy and Buildings* 303 (janvier): 113824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113824>.
- Jolliet, Olivier, Myriam Saadé-Sbeih, Pierre Crettaz, Nicole Jolliet-Gavin, Shanna Shaked. 2017. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. 3ème édition. PPUR presses polytechniques. ISBN 9782889151356

Merci pour votre attention
Des questions ?

charlotte.roux@minesparis.psl.eu |

aurore.wurtz@enpc.fr | marie-lise.pannier@univ-angers.fr