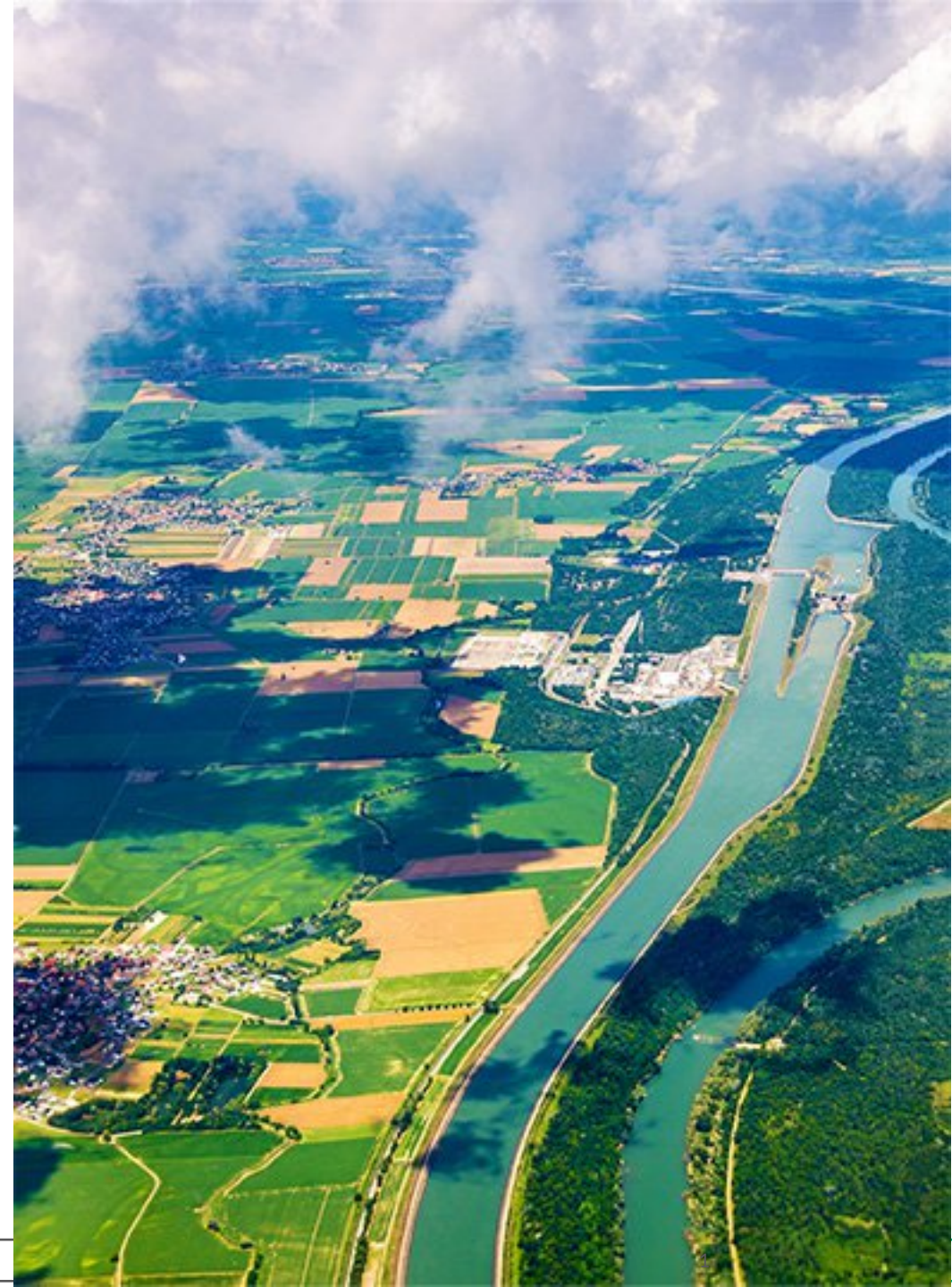


Impacts environnementaux du démantèlement de la centrale de Fessenheim par l'analyse du cycle de vie

Paul Robineau

Mehdi Iguyer
Maria Boltoeva
Michal Kozderka

Nicolas Arbor
Gaetana Quaranta



Structure de la présentation

1. Principes de l'analyse du cycle de vie (ACV)
2. ACV pilote du démantèlement de la centrale de Fessenheim
3. Impacts radiologiques : comparaison prospective entre approches d'évaluation du risque (ER) et ACV
4. Travaux ouverts : ACV prospective complète
5. Questions / Réponses

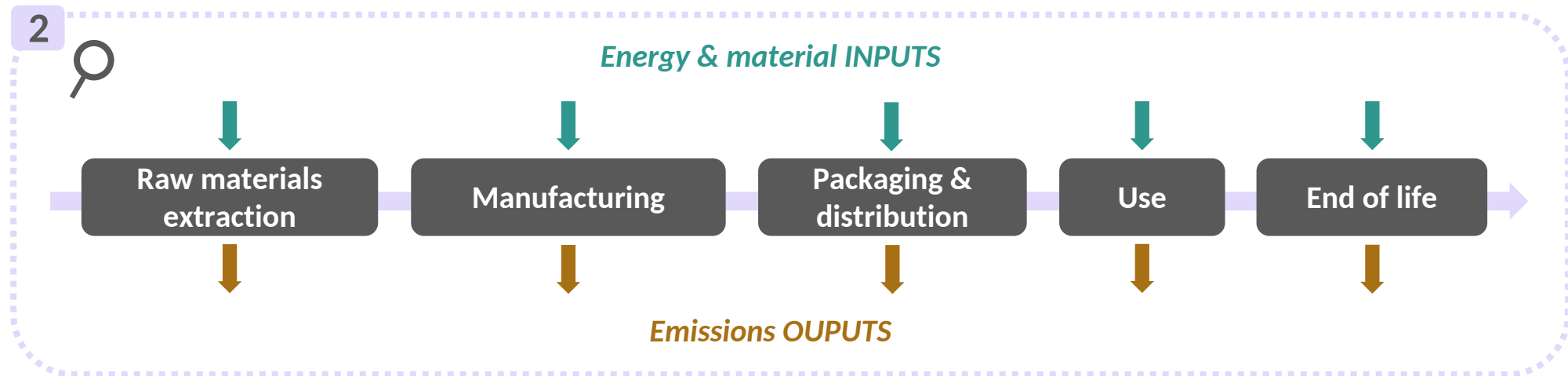
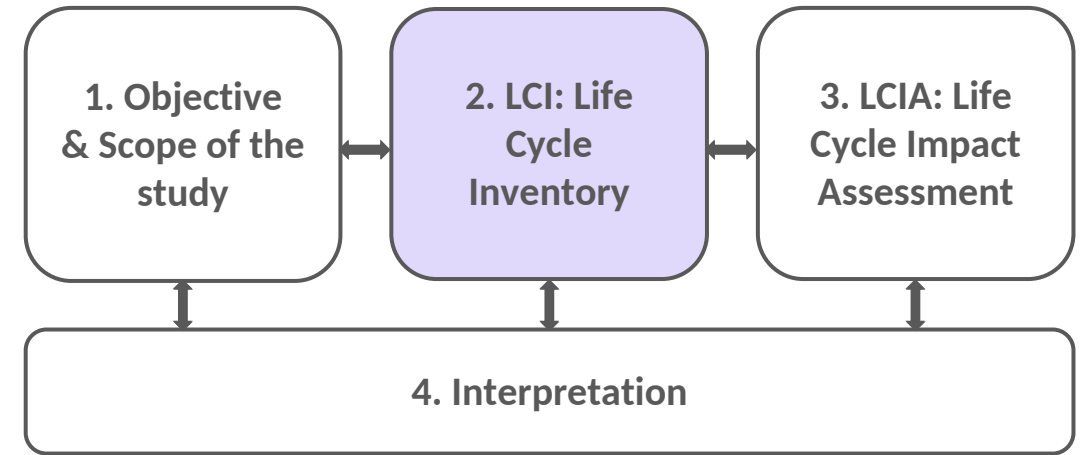
1. Principes de l'ACV

1. Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV)
2. Calcul des impacts environnementaux
3. Distinction entre système d'avant-plan / arrière-plan

1.1 Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV / LCA)

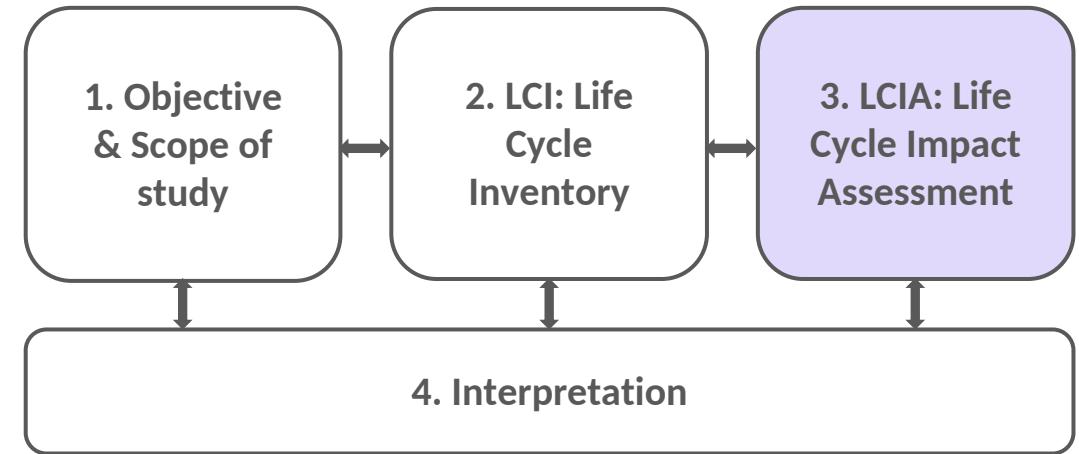
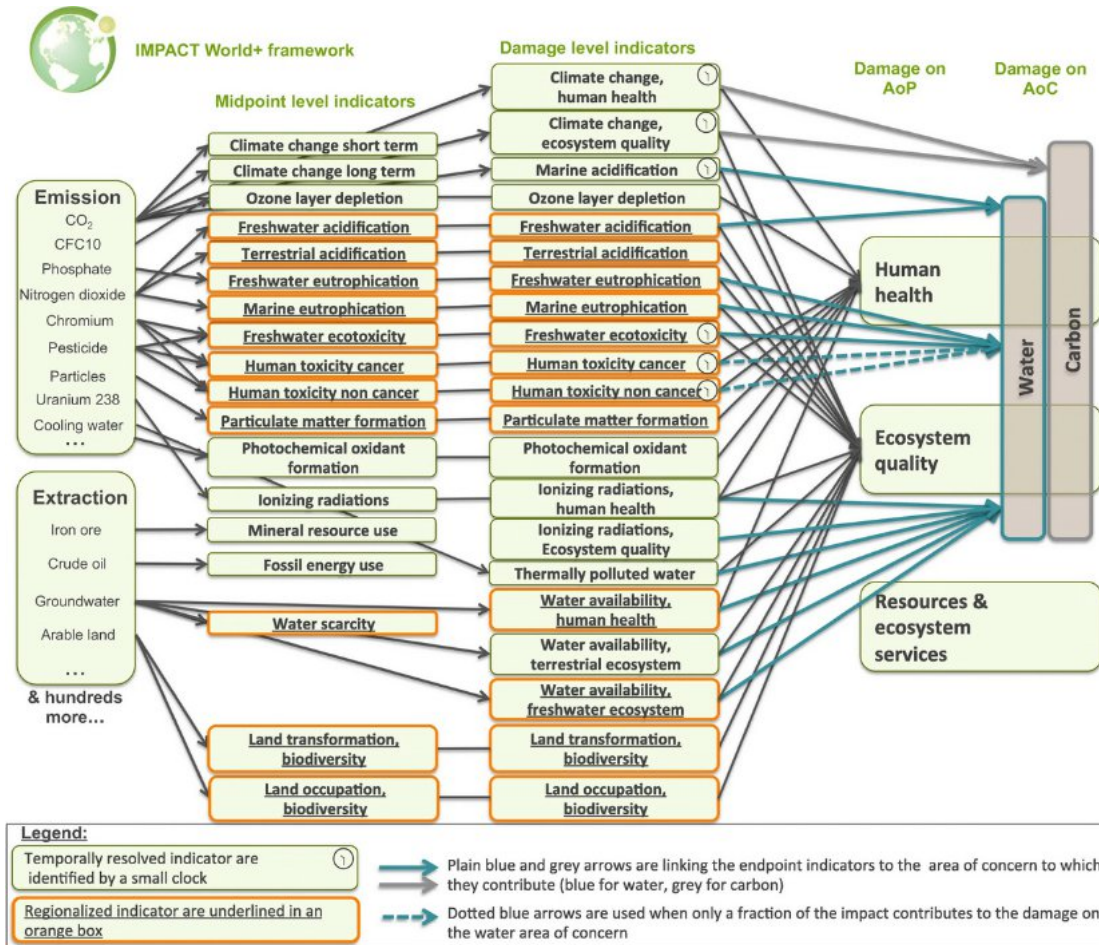
Méthode d'évaluation d'impacts environnementaux

- Applicable à tout système / produit / service
- Portant sur l'ensemble du cycle de vie
 - Multicritères & quantitative
 - Normalisée (ISO 14 040/44)



1.2 Calcul des impacts environnementaux

Bulle et al. 2019. *IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method*. Int J Life Cycle Assess 24, 1653–1674. [DOI](#).



3



Pour toute substance i
émise ou extraite
d'un compartiment environnemental e

$$CF_i^e = FF_i^e \cdot XF_i^e \cdot EF_i^e$$

Characterization Factor = Fate Factor · Exposure Factor · Effect Factor

$$I = \sum CF_i^e \cdot M_i^e$$

Impact score = Sum of Characterization Factor · Amount

1.3 Système d'avant-plan / arrière-plan

Système d'avant-plan : le système étudié

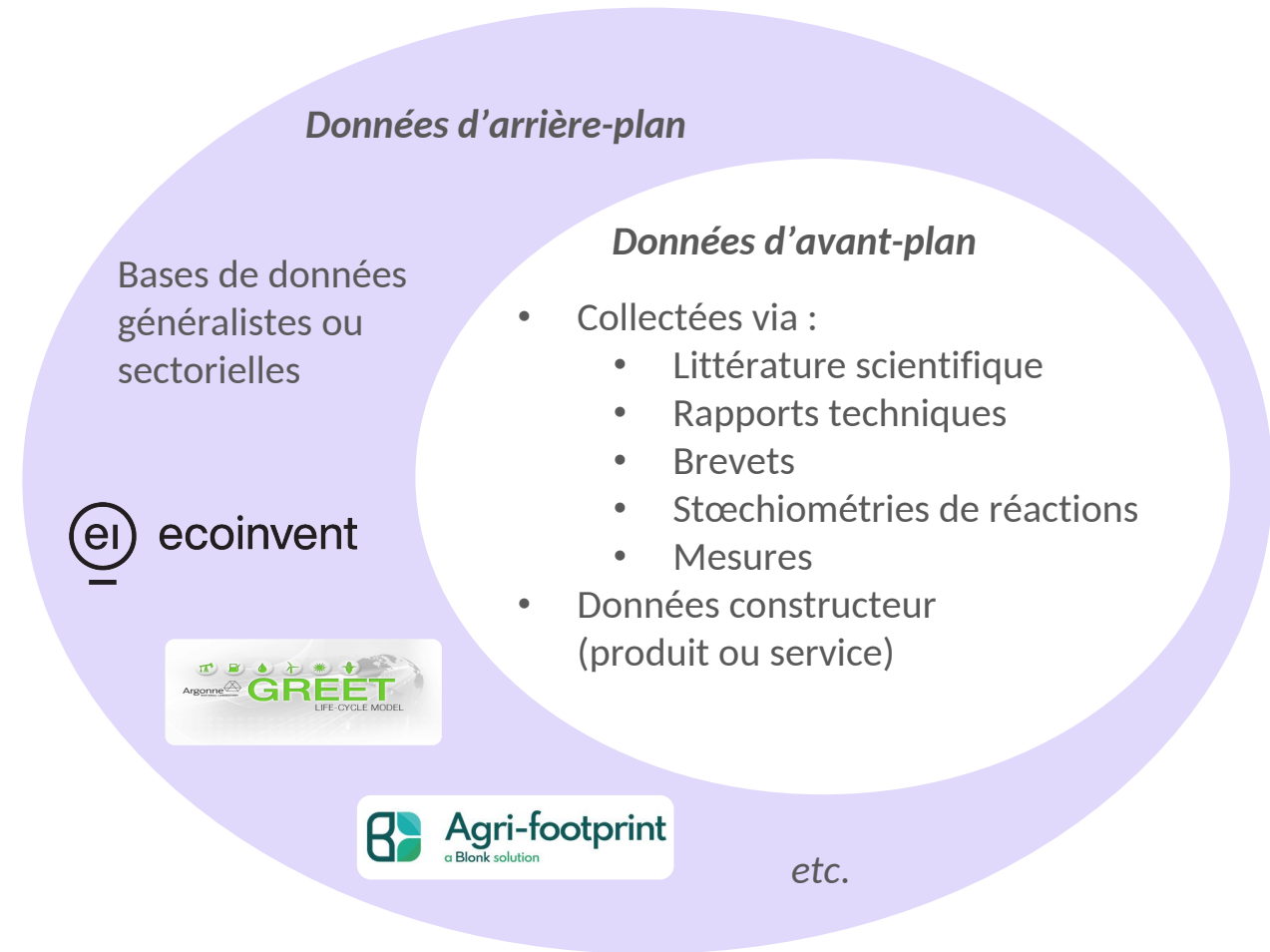
→ Généré par :

La personne réalisant l'étude

Système d'arrière-plan : l'infrastructure générale conditionnant le système étudié

→ Typiquement :

Mix électrique, transports, etc.



2. ACV pilote du démantèlement de Fessenheim

1. Contexte global
2. Frontières du système
3. Principaux résultats
4. Bilan

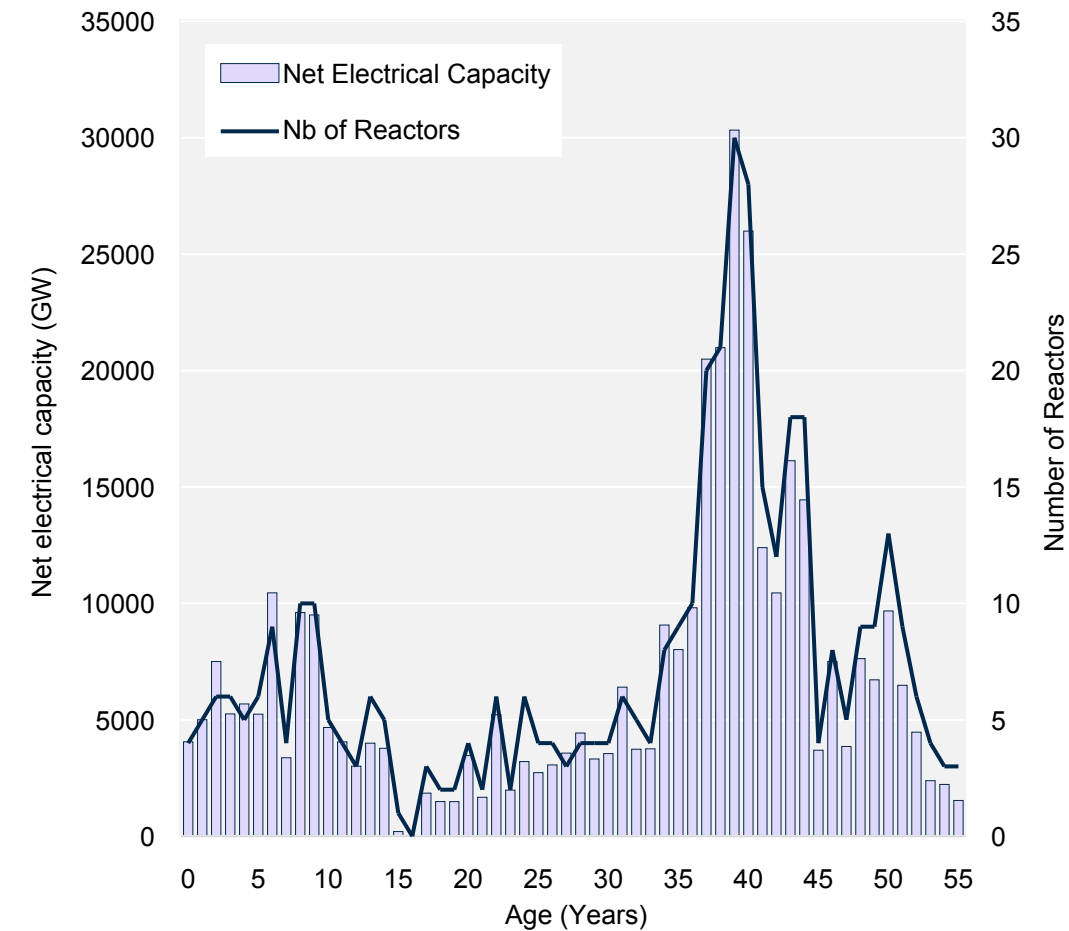
2.1 Contexte global

Peu d'études ACV sur l'impact environnemental d'un démantèlement :

- Focus sur la construction/opération, l'impact changement climatique
- Avant 2024 : seulement 2 études ACV spécifiques au démantèlement de centrale nucléaire
Wallbridge et al. 2013 : 241 kt CO₂ eq ; 3.5 g CO₂ eq / kWh
Seier & Zimmerman 2014 : 1.6 Mt CO₂ eq ; 11.3 g CO₂ eq / kWh
- 2025 : une nouvelle étude met à jour l'étude de Wallbridge et al. 2013
Kirk et al. 2025 : 212 kt CO₂ eq ; 3.1 g CO₂ eq / kWh

Les ACV sur le cycle complet du nucléaire :

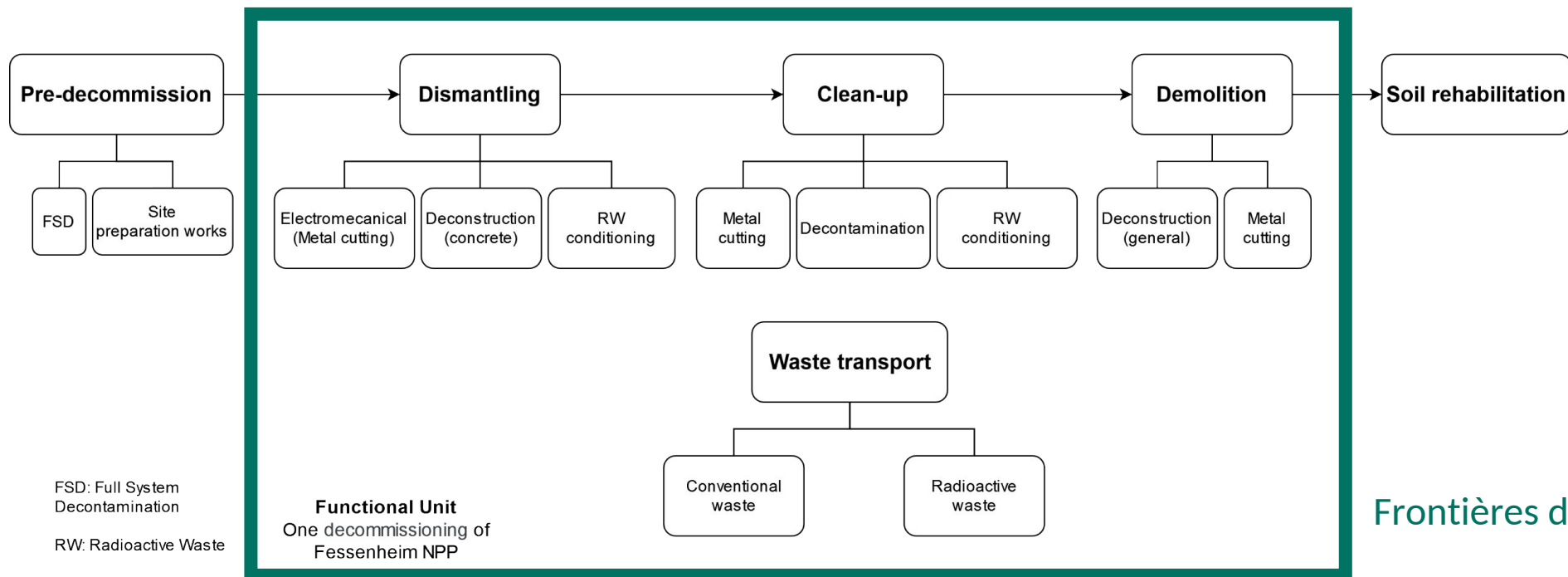
- Modélisation de la fin de vie par approximation
Représente souvent 10-15% du cycle complet
- En France, EDF : 4 g CO₂ eq / kWh (cycle complet)



2.2 Frontières du système

À partir des premiers résultats de M. Iguyer (stage OHM Fessenheim), sur la base du *Plan de démantèlement de Fessenheim* (EDF, 2020) :

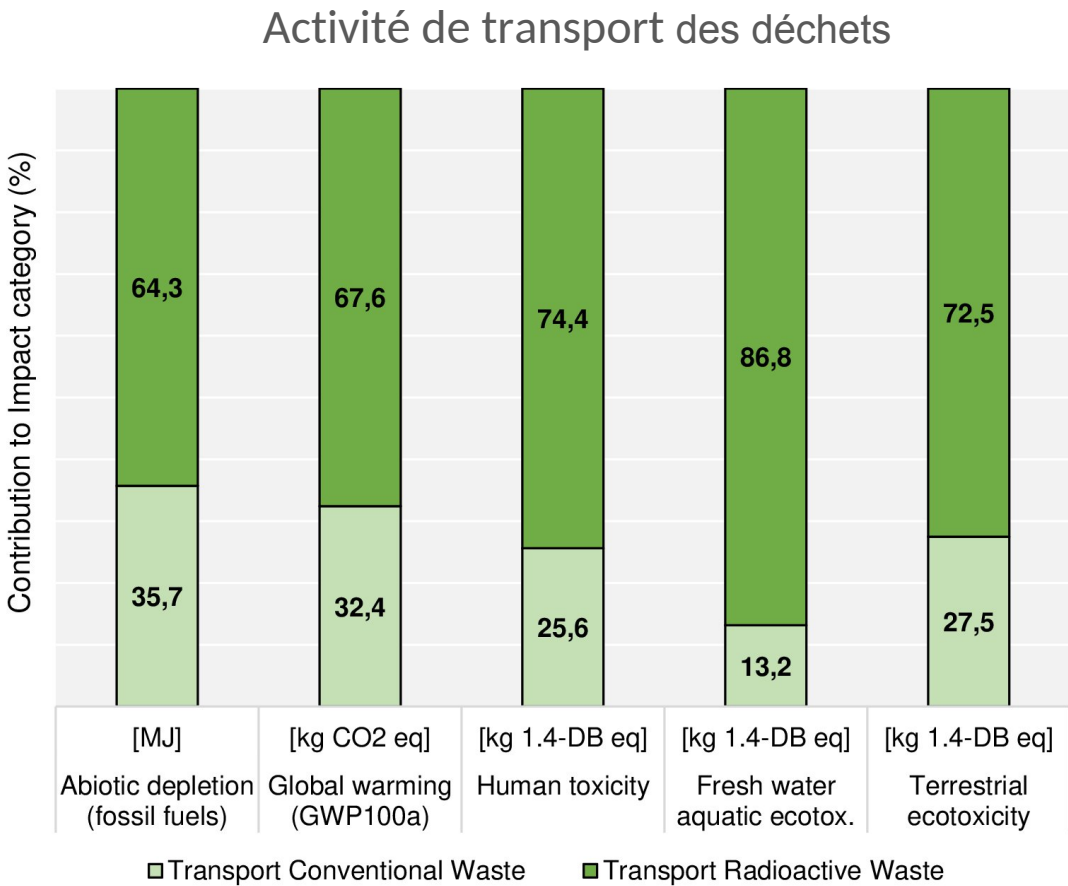
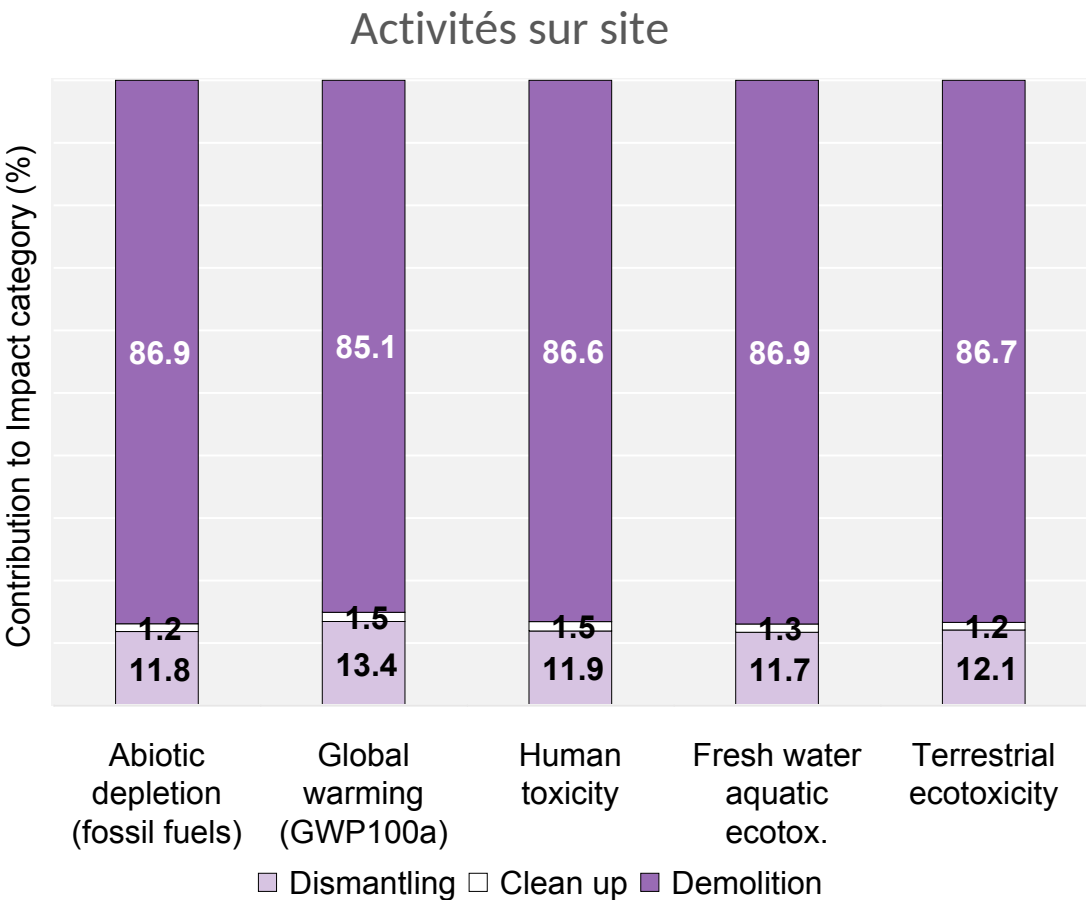
Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Iguyer M., Robineau P., Kozderka M., Boltoeva M., Quaranta G. (2024). Int J Life Cycle Assess 29.7. [DOI](#).



Frontières du système

2.3.1 Répartition générale des impacts

Iguider M., Robineau P., et al., 2024. Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Int J Life Cycle Assess. 29.7. DOI.



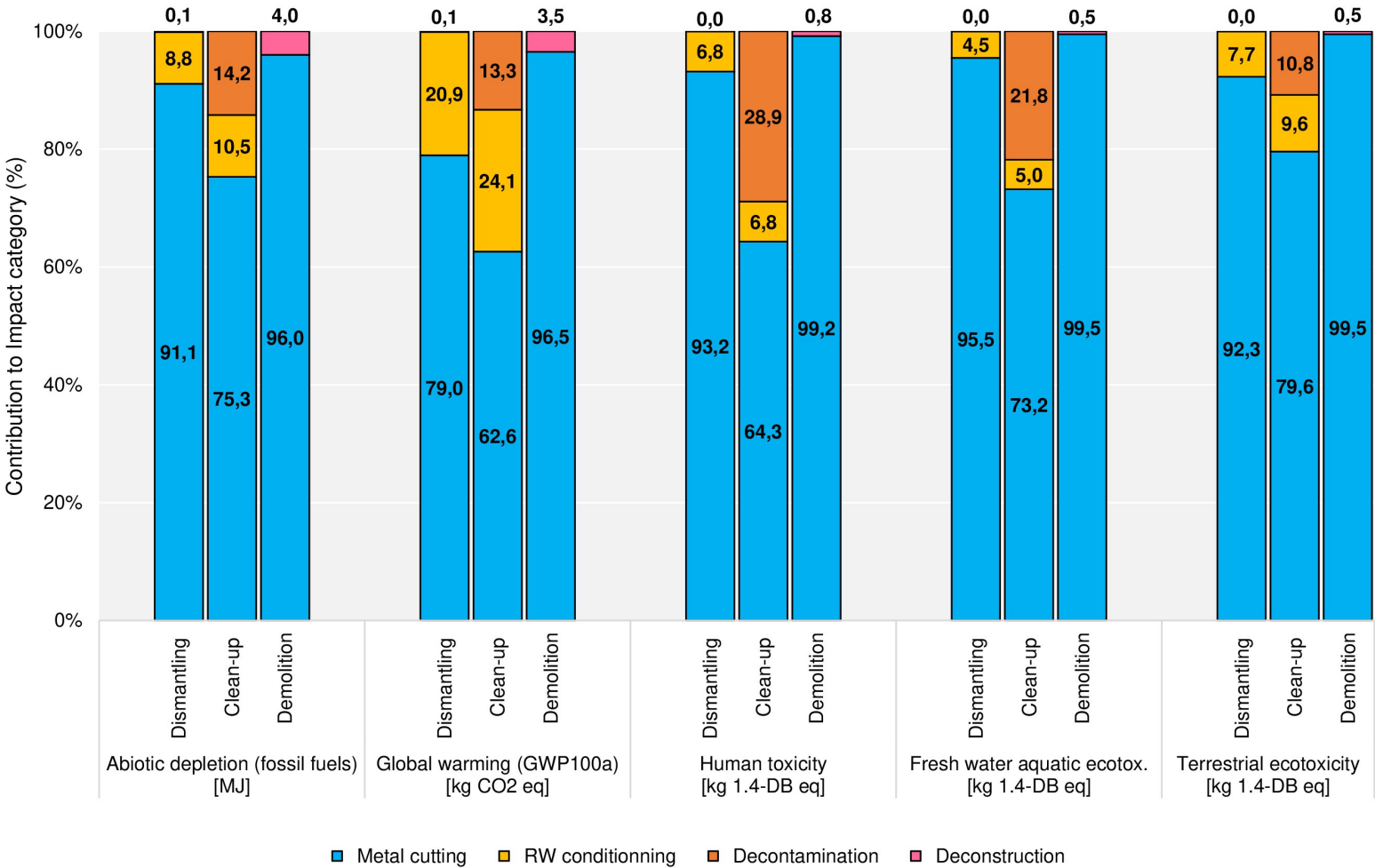
Méthode de calcul d'impact : CML-IA baseline

2.3.2 Contributions pour les activités sur site

Iguider M., Robineau P., et al., 2024. *Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data*. Int J Life Cycle Assess. 29.7. DOI.

Pour notre frontière de système, la découpe des métaux s'impose comme un processus clé

- Quelque soit le processus
- Quelque soit l'indicateur d'impact



Méthode de calcul d'impact : CML-IA baseline

2.3.3 Analyse de sensibilité sur système complet

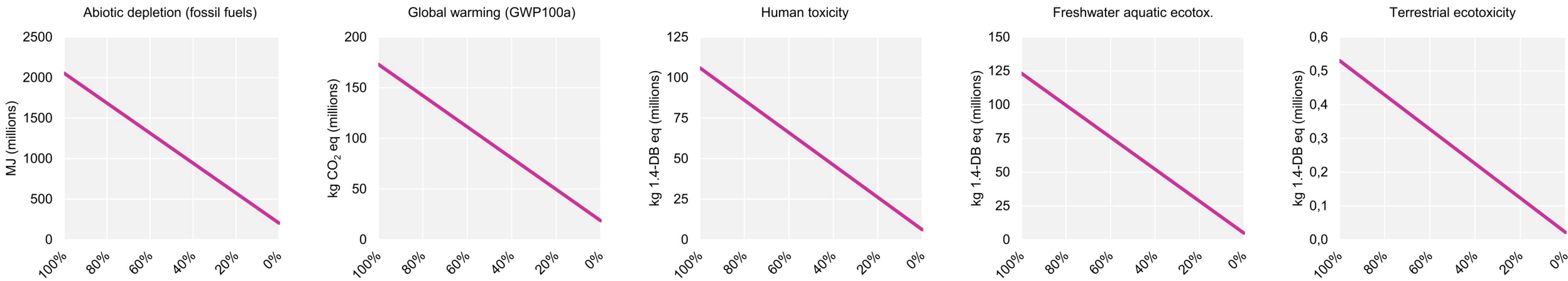
Iguider M., Robineau P., et al., 2024. *Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data*. Int J Life Cycle Assess. 29.7. [DOI](#).

Hypothèses :

- Proportions relatives de découpes
Oxy-acétylène / Plasma stables (découpe thermique)
- Remplacement découpe thermique
par découpe mécanique

Diminution des impacts prédits :

- Découpe thermique/mécanique 50/50 : ~ 45-48 %
- Découpe thermique/mécanique 0/100 : ~ 89-96 %



Méthode de calcul d'impact : CML-IA baseline

2.3.4 Comparabilité des cas d'étude existants

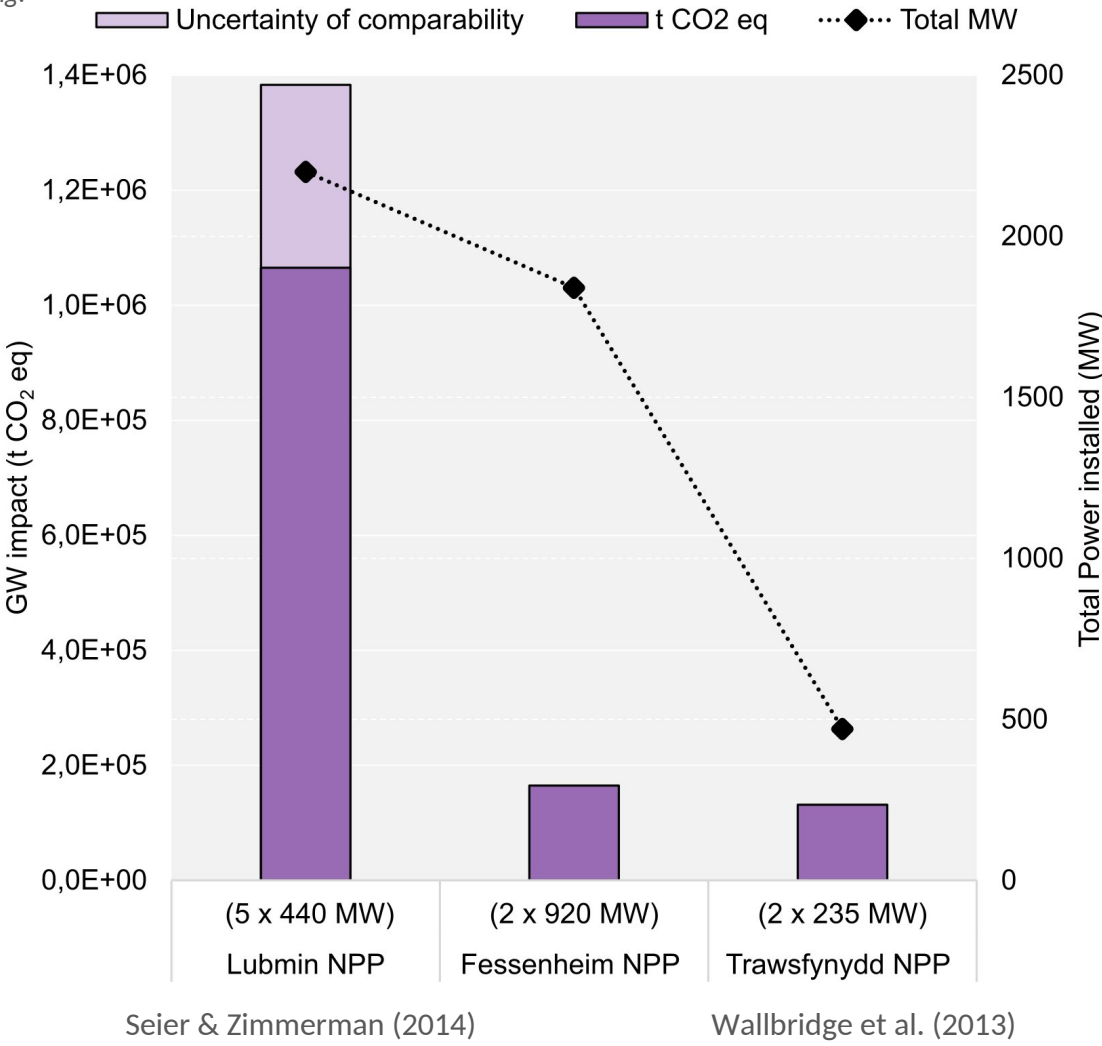
Iguider M., Robineau P., et al., 2024. Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Int J Life Cycle Assess. 29.7. [DOI](#).

Différences rendant les systèmes évalués difficilement comparables :

- Agencement des processus et frontières de système utilisées
- Base de données d'arrière-plan

Cela étant :

- Pas de lien avec la puissance installée
- Potentiel lien avec le nombre de réacteurs (mais seulement 2 pts de données)



2.4 Bilan

Iguider M., Robineau P., et al., 2024. Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Int J Life Cycle Assess. 29.7. [DOI](#).

Conclusions & recommandations

- Le démantèlement représente ~ 0.4 g CO₂ eq / kWh au maximum dans notre étude de Fessenheim
~10% de l'estimation EDF pour le cycle complet du nucléaire en France
→ Confirme l'ordre de grandeur issu des approximations utilisées dans la littérature (pour le changement climatique)
- Minimiser la découpe thermique autant que possible
Selon les contraintes de sécurité des travailleurs, les coûts, etc.
- Incite à la poursuite des réflexions sur la gestion des déchets, en particulier les TFA (VLLW)
65% en masse, 40% en volume, statut unique en France, possibilités de recyclage (Technocentre)

Limitations et améliorations possibles :

- Qualité de l'inventaire de cycle de vie :
Manque de données détaillées et transparentes ; même avec les éléments de l'étude d'impact EDF publiée en 2024
- Prise en compte de la dimension temporelle (ACV prospective)
15 ans de démantèlement ; nécessité d'utiliser les outils d'ACV prospective pour affiner l'évaluation

3. Impacts radiologiques du démantèlement

- 1. Impacts radiologiques en ACV
- 2. Périmètre de l'étude
- 3. Résultats au niveau *midpoint*
- 4. Résultats au niveau *endpoint*
- 5. Bilan

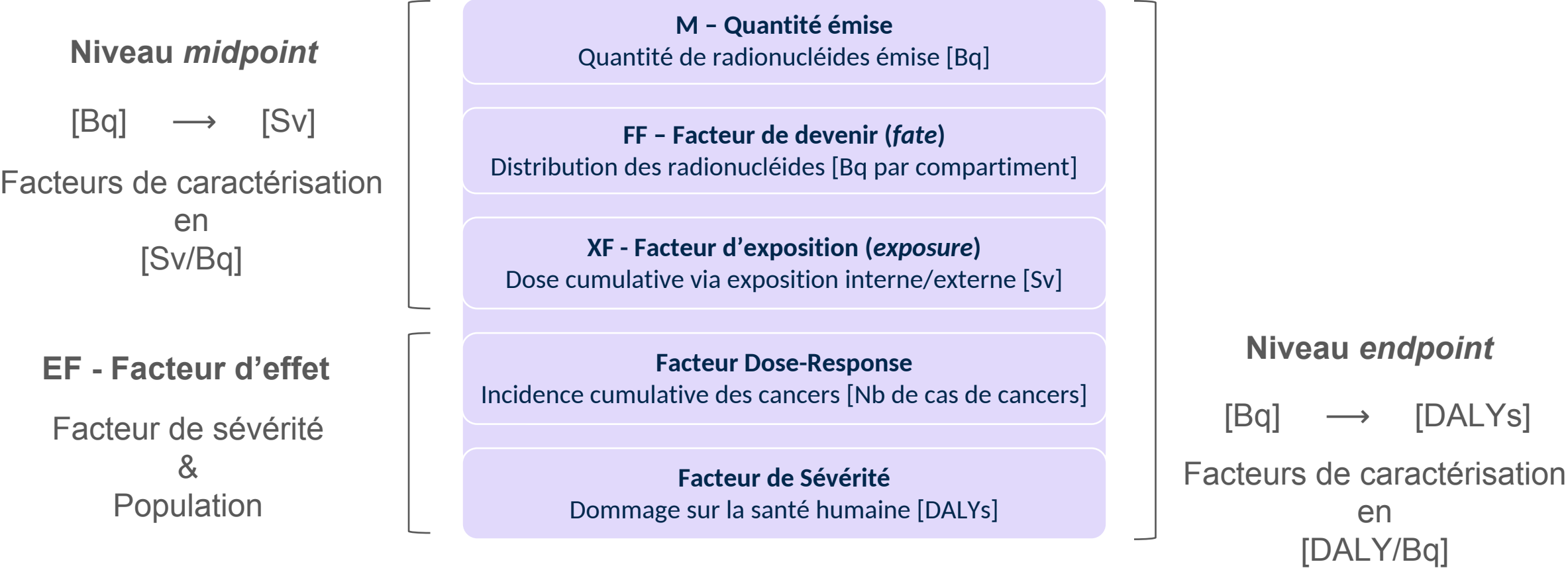
3.1.1 Approche méthodologique en ACV

$$CF_i^e = FF_i^e \cdot XF_i^e \cdot EF_i^e$$

Characterization Factor = Fate Factor · Exposure Factor · Effect Factor

$$I = \sum CF_i^e \cdot M_i^e$$

Impact score = Sum of Characterization Factor · Amount



3.1.2 Une catégorie d’impacts historiquement sous étudiée

Paulillo *et al.* 2018. *Environ Rev*, 26, 239–254. [DOI](#).

En 2018:

- 7 tentatives de méthodes (5 orientées humaines, 2 orientées écosystèmes)
- Seulement 1 actuellement implémentée dans les outils ACV comme composant d’une méthode globale d’évaluation d’impacts

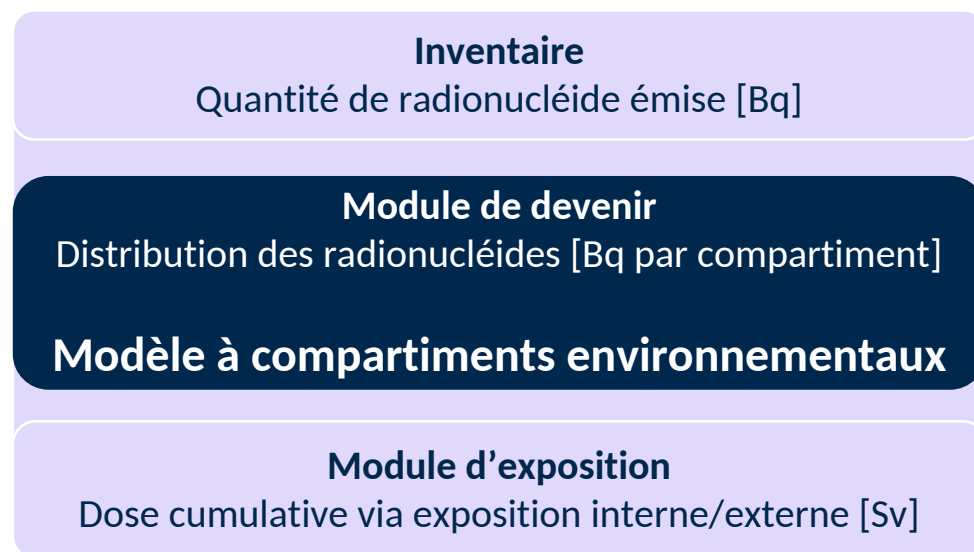
Methodology	Emission type	Scope	Applicability	Impacts estimation	Indicator	Metric	Reference
Critical Volume	Direct routine discharges	Humans	Site-independent	Worst case	Midpoint	kg body weight	(Heijungs et al. 1992b)
Site-specific	Direct routine discharges	Humans	Site-specific	Worst case	Midpoint	Sv or ManSv	(Simmonds et al. 1995)
Damage-based	Direct routine discharges	Humans	Site-independent (preferably applicable in Europe)	Average	Endpoint	DALY	(Frischknecht et al. 2000)
Human Irradiation	Direct routine discharges and emissions from solid waste	Humans	Site-dependent	Worst case	Endpoint	Risk	(Solberg- Johansen 1998)
NDA Value Framework	Direct routine discharges and emissions from solid waste	Humans	Site-dependent	Worst case	Endpoint	Sterling	(Wareing 2009)
Environmental Irradiation	Direct routine discharges and emissions from solid waste	Ecosystems	Site-dependent	Worst case	Endpoint	-	(Solberg-Johansen 1998)
SLERA	Direct routine discharges to freshwater	Ecosystems	Site-independent	Average	Midpoint	CTUe	(Garnier-Laplace et al. 2009)

3.1.3 Deux indicateurs ACV récents : le cas UCrad

Paulillo *et al.* 2020. *Sci Total Env*, 708, 135179. [DOI](#).

Évaluation moyenne globale typique de l'ACV

- Pour comparaison avec USEtox (méthode ACV pour l'impact des toxiques conventionnels)



Principale utilité :

- Évaluation comparative de technologies

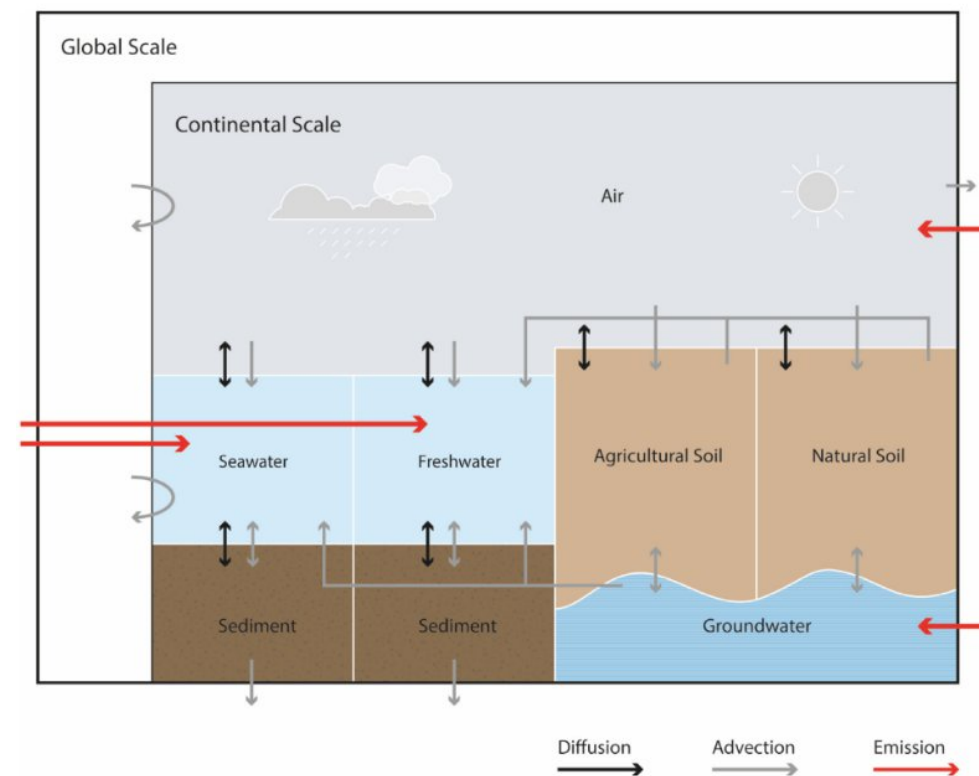


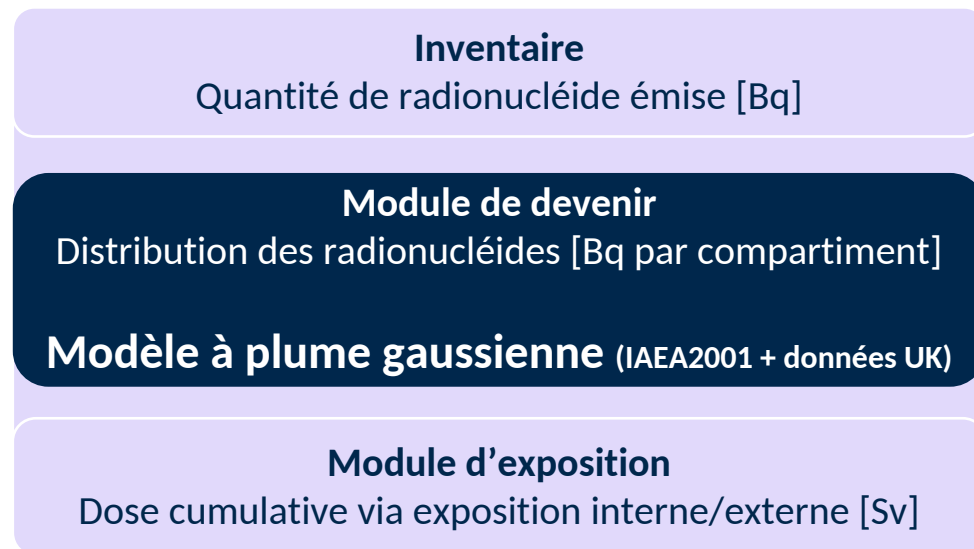
Fig. 3. Compartments considered in UCrad fate model.

3.1.3 Deux indicateurs ACV récents : le cas CGM

Paulillo *et al.* 2020. *Sci Total Env*, 708, 135179. [DOI](#).

Adapté de la *Critical Group Methodology*

- Pour comparaison avec les approches d'évaluation de risque (ER)



Principale utilité :

- Évaluation préliminaire à l'échelle « usine » (*screening*)

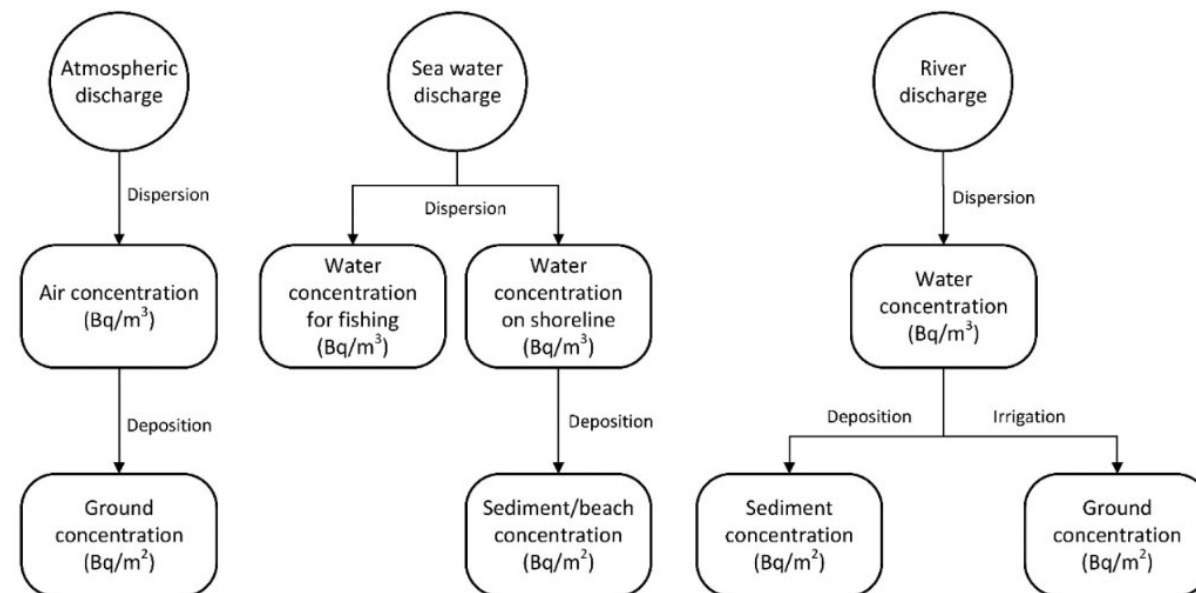


Fig. 2. Overview of the CGM Fate Module, adapted from IAEA (2001).

Critical Group : représentatif de celles et ceux dont il est attendu qu'ils reçoivent les plus hautes doses, suffisamment petit pour être homogène au regard de l'âge, alimentation, et comportements qui affectent les doses reçues

3.2 Données utilisées et objectifs

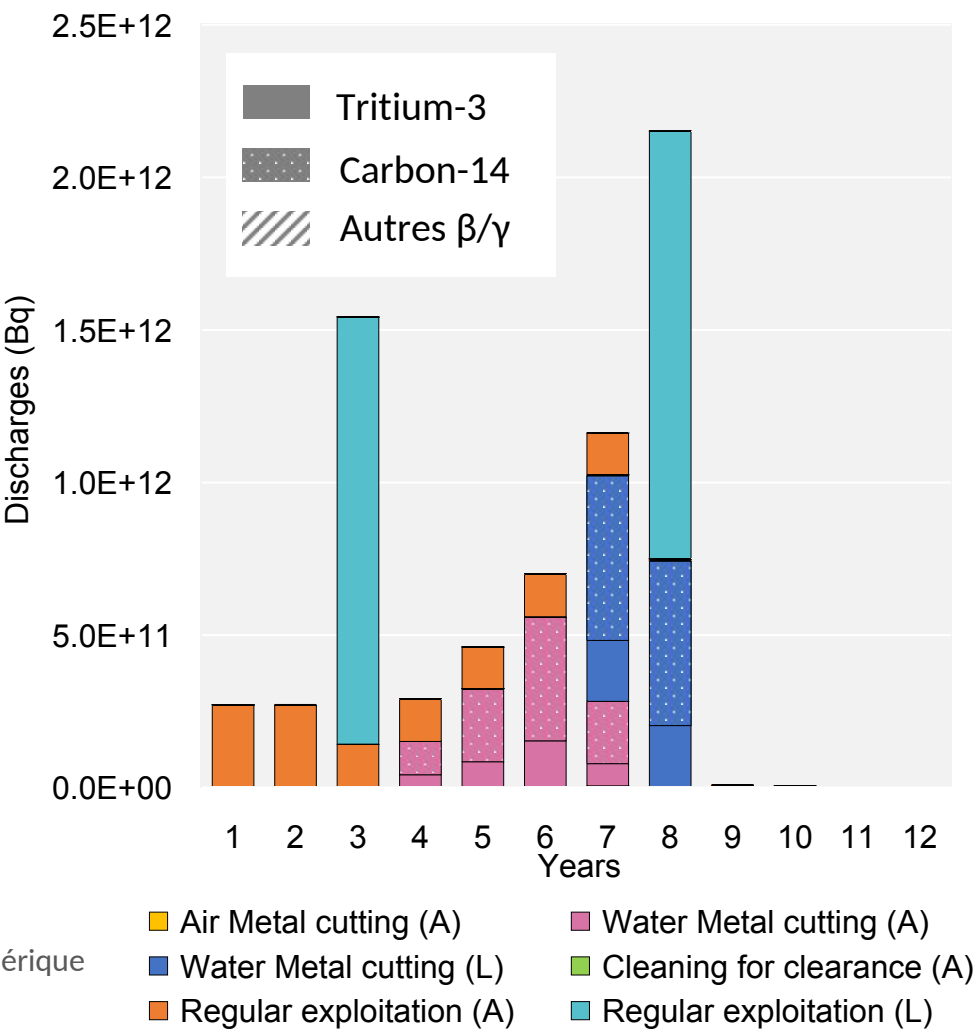
Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.

À partir de l'étude d'impact réglementaire de EDF (2024) :

- Inventaire annualisé des émissions radioactives du démantèlement
- Résultats d'impacts selon une approche d'évaluation des risques (ER) disponibles

Étude comparative des approches ACV/ER :

- Mise à l'épreuve des méthodes de calcul d'impact développées pour l'ACV
- Recommandation méthodologiques



3.3 Impacts *midpoint* (risques, en Sv)

Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.

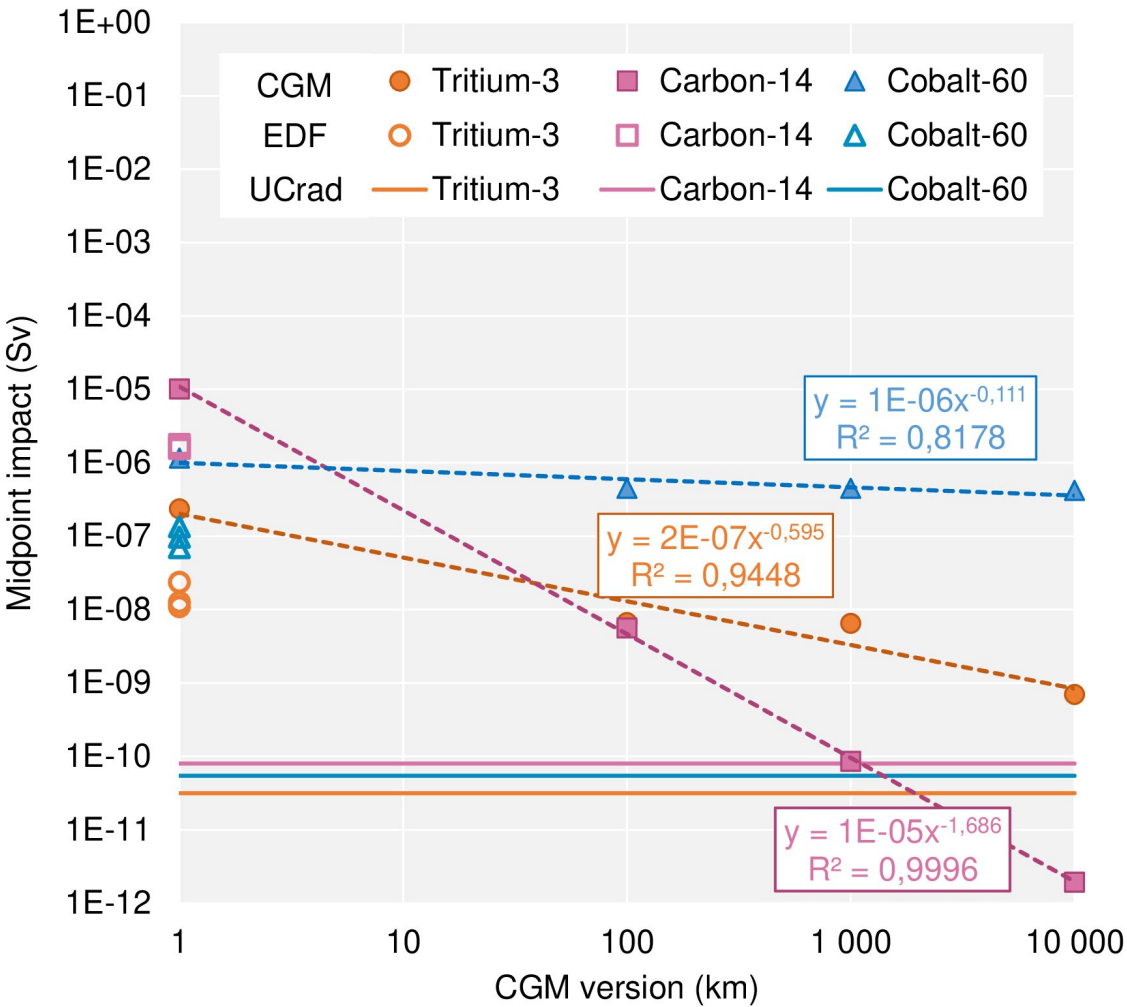
3 radionucléides dominants

Variation des contributions selon la méthode utilisée

CGM 1 km > ER (EDF 2024) :

- Surestimation intrinsèque de CGM
- Même via CGM : dose efficace 400 fois inférieure à l'exposition annuelle moyenne française (4,5 mSv)

Méthode	Contributions relatives (%)			Total (Sv)
	Tritium-3	Carbon-14	Cobalt-60	
ER (EDF 2024)	0.66-1.23	91.23-94.53	4.22-7.63	$1.77 \cdot 10^{-6}$
CGM 1 km	2.04	87.36	9.98	$1.16 \cdot 10^{-5}$
CGM 100 km	1.44	1.22	97.31	$4.64 \cdot 10^{-7}$
CGM 1000 km	1.42	0.02	98.54	$4.56 \cdot 10^{-7}$
CGM 10 000 km	0.17	$5 \cdot 10^{-4}$	99.82	$4.22 \cdot 10^{-7}$
UCrad	18.94	48.04	32.86	$1.66 \cdot 10^{-10}$



3.4.1 Impacts *endpoint* (dommages, en DALYs) d'après UCrad

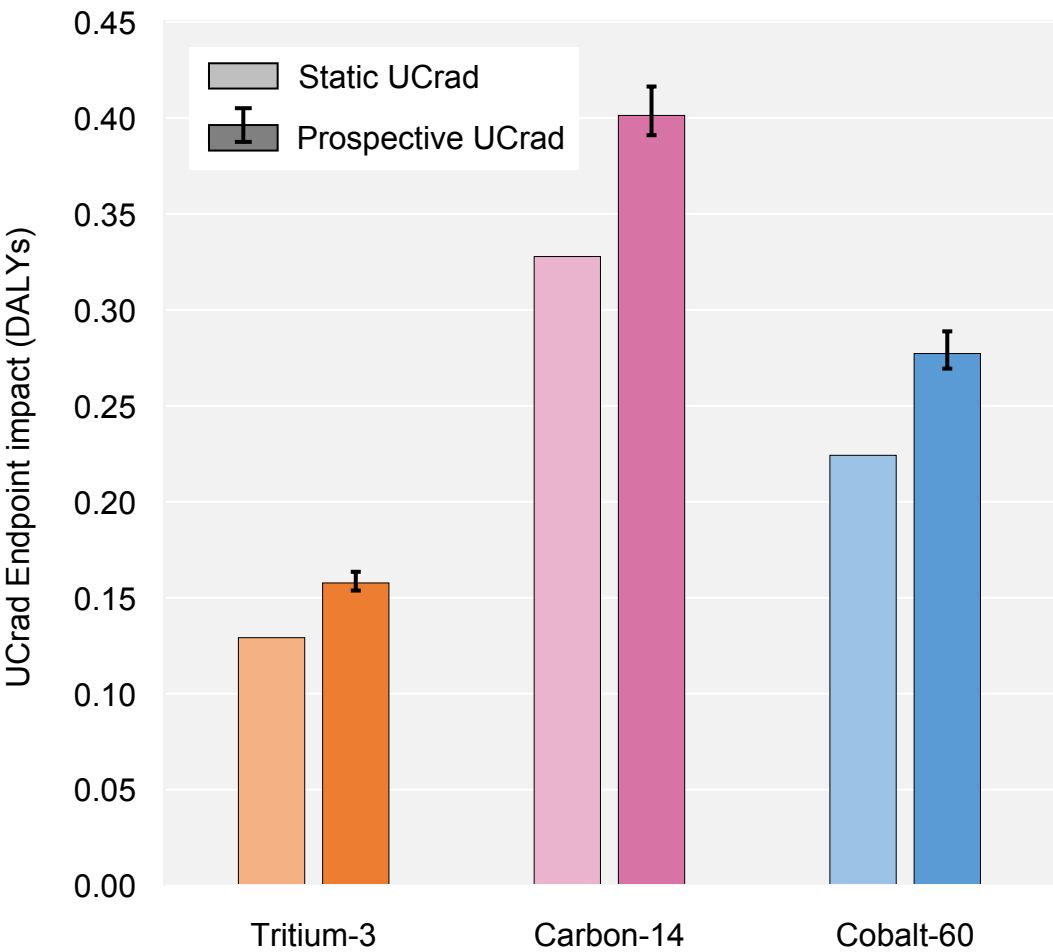
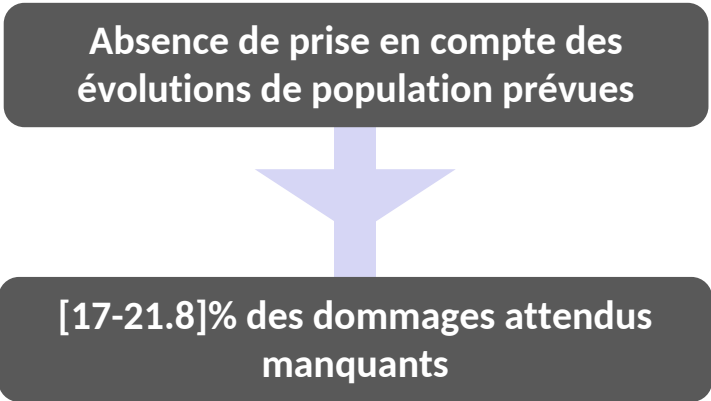
Robineau P., et al., 2025. *Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches*. Sci Tot Env. 974. 179200. [DOI](#).

Static UCrad

Facteurs de caractérisation (CFs) originaux
(Paulillo et al. 2023)

Prospective UCrad

Utilisation de données prospectives de population pour modifier les CFs



3.4.2 Impacts *endpoint* (dommages, en DALYs) d'après CGM

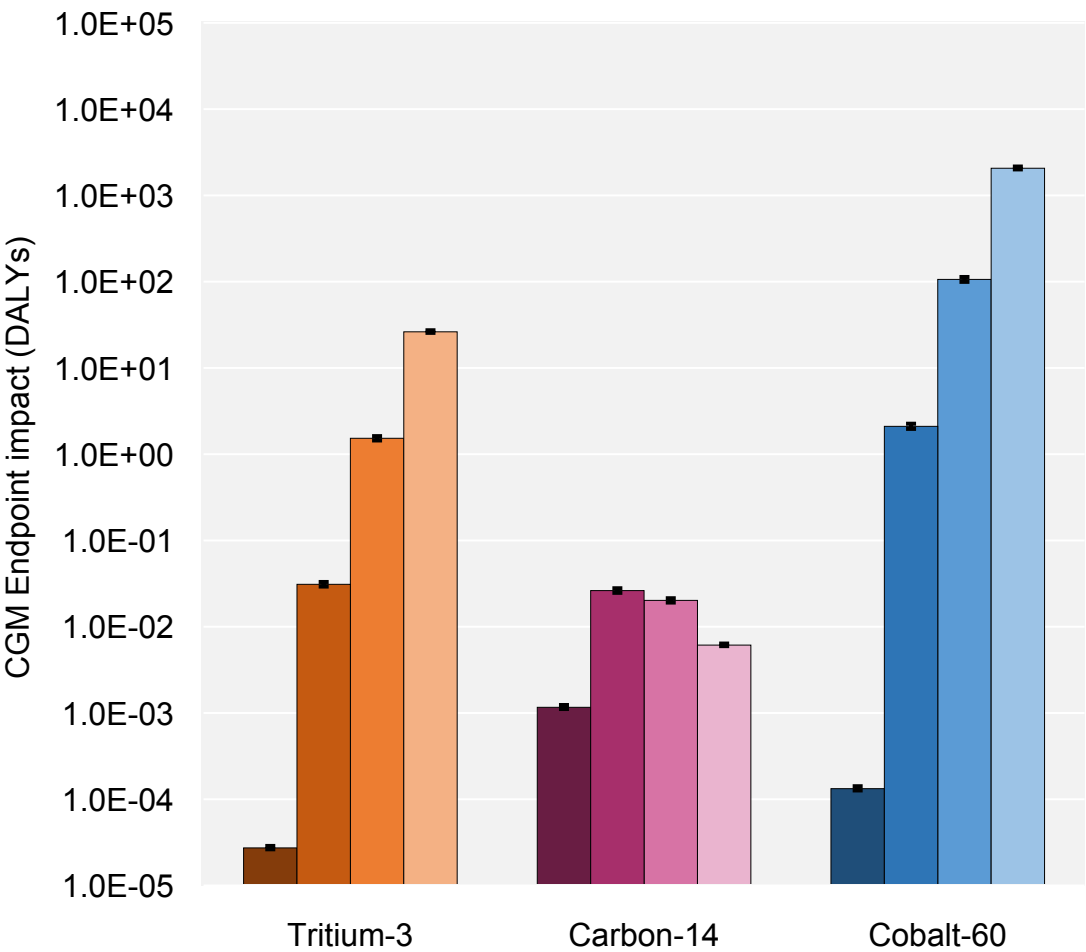
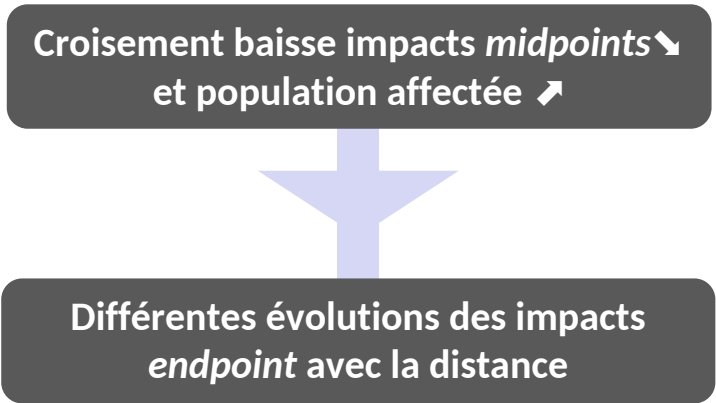
Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. [DOI](#).

Prospective CGM 1 – 10 000 km

Population de chaque intervalle spatial :

- Extraite uniformément
- Traitée comme agrégée à la frontière la plus éloignée

Résultats eq. à une estimation minimale
Peut sous estimer l'impact jusqu'à un facteur 8



3.5 Bilan

Robineau P., et al., 2025. *Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches*. Sci Tot Env. 974. 179200. [DOI](#).

Éléments spécifiques au démantèlement de Fessenheim:

- 3 radionucléides clés identifiés systématiquement par les différentes approches : ^3H , ^{14}C , ^{60}Co
- Le pire cas d'estimation de dose totale reçue (risque) par le public sur 15 ans (11.6 μSv)
→ 400 fois inférieure à l'exposition annuelle moyenne en France (4.5 mSv, IRSN 2021)

Éléments méthodologiques généraux :

- L'indicateur CGM pour l'ACV donne des surestimations particulièrement importantes par rapport aux approches ER
Besoin: CFs régionalisés, meilleure modélisation du compartiment environnemental « eau douce »
- Le décompte prospectif de la population à systématiser pour des évaluations pertinentes des dommages
Vrai pour tous les indicateurs ACV orientés « santé humaine » comme USEtox (toxiques conventionnels)

4. Travaux en cours : ACV prospective complète

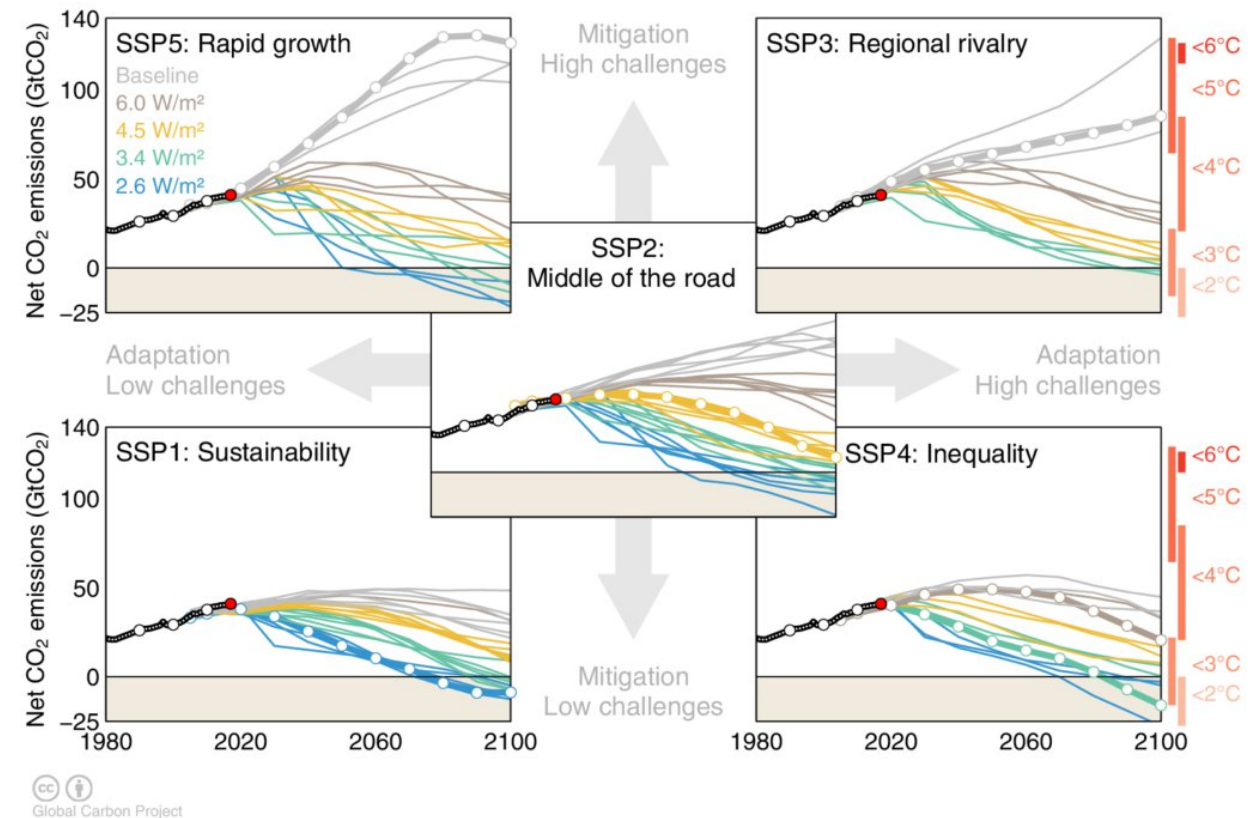
1. Principe de l'ACV prospective
2. Inventaire annualisé des transports de déchets
3. Résultats pour l'impact CO₂
4. Analyse de sensibilité

4.1 Principe de l'ACV prospective

« *Futurisation* » du système d'arrière-plan
= de la base de donnée utilisée pour les calculs
(ecoinvent), via scénarios :

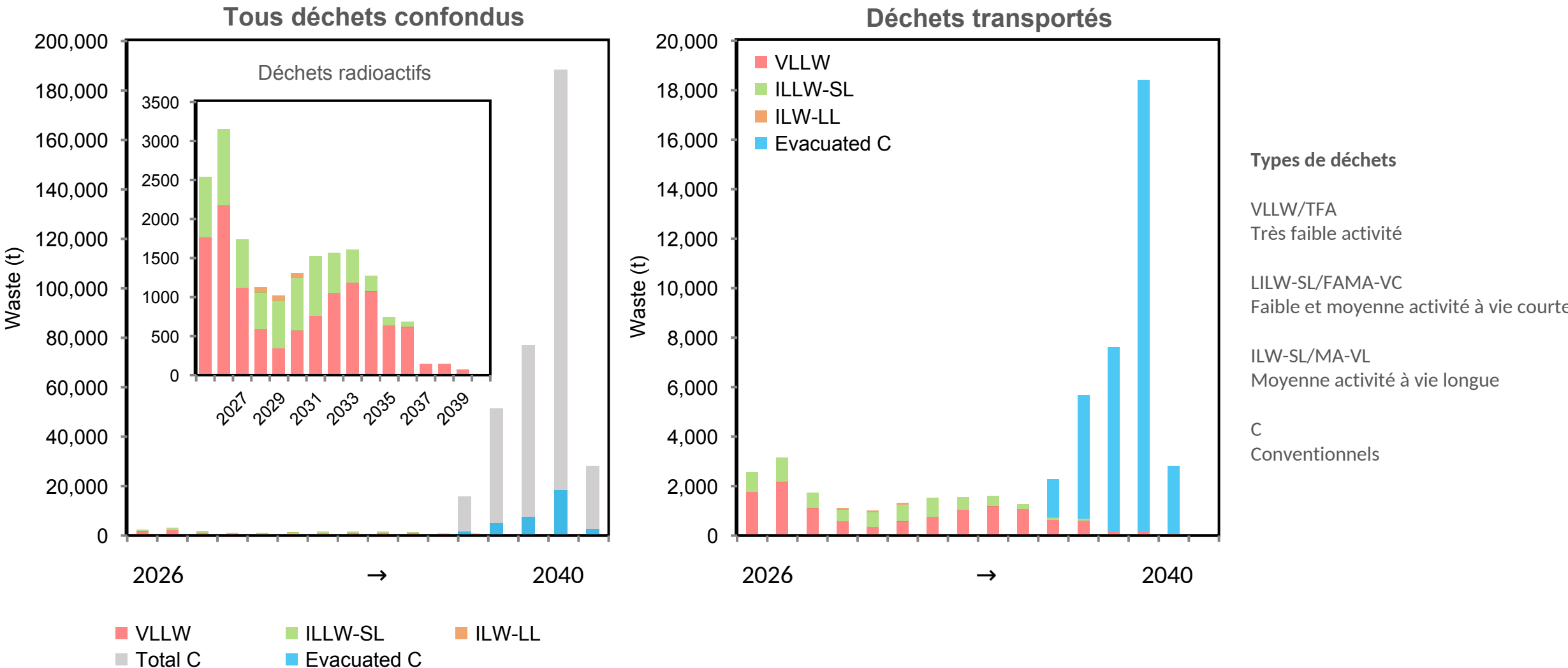
Prise en compte des tendances socioéconomiques globales :

- Activité économique
- Population
- Évolutions technologiques
- Consommation de matières premières
- Politiques publiques de transition
- Émissions
- etc.



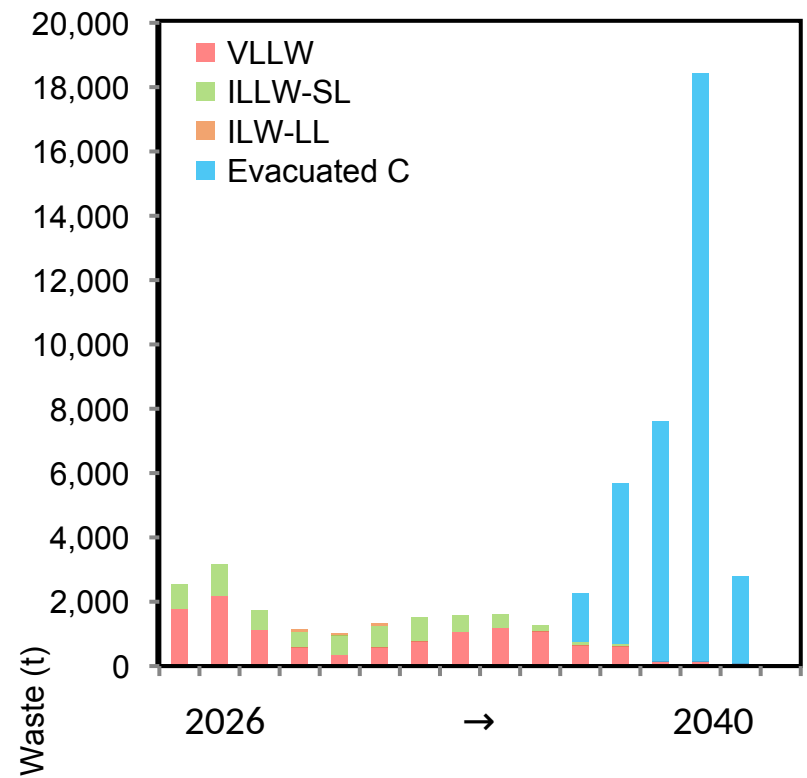
Nécessite une annualisation complète de l'inventaire du démantèlement !

4.2.1 Une production de déchets très hétérogène

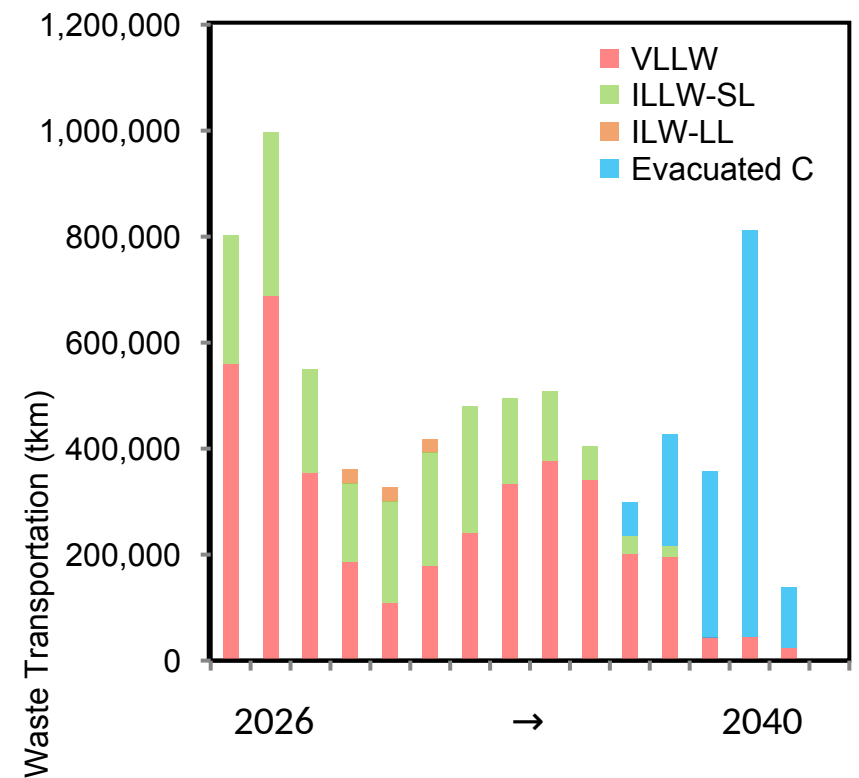


4.2.2 Hypothèses d'avant-plan nécessaires

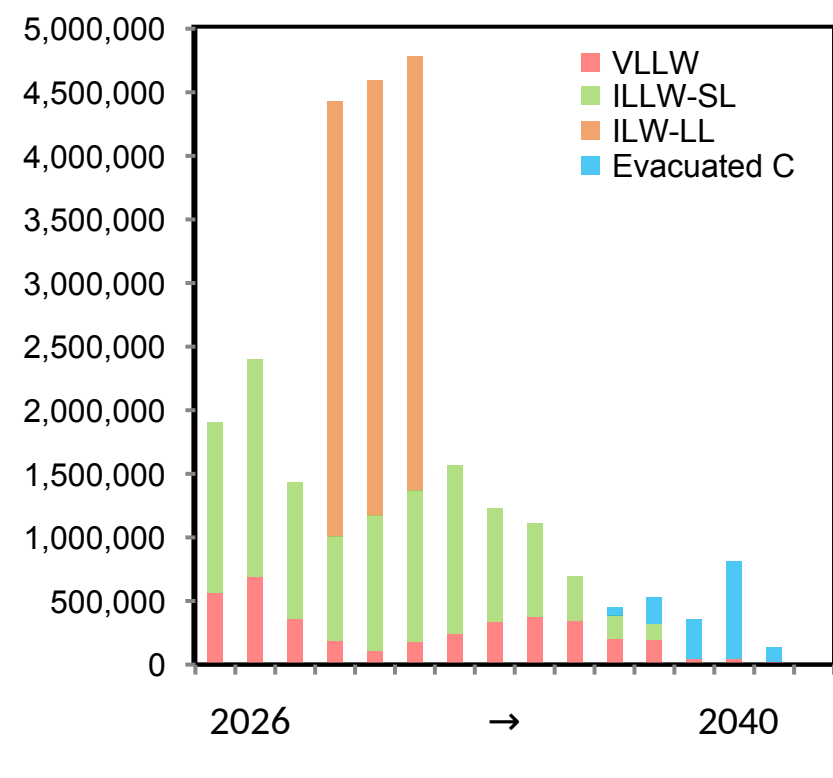
Masses produites annoncées (EDF, 2024)



H0 : Transport SANS cond. supplémentaire



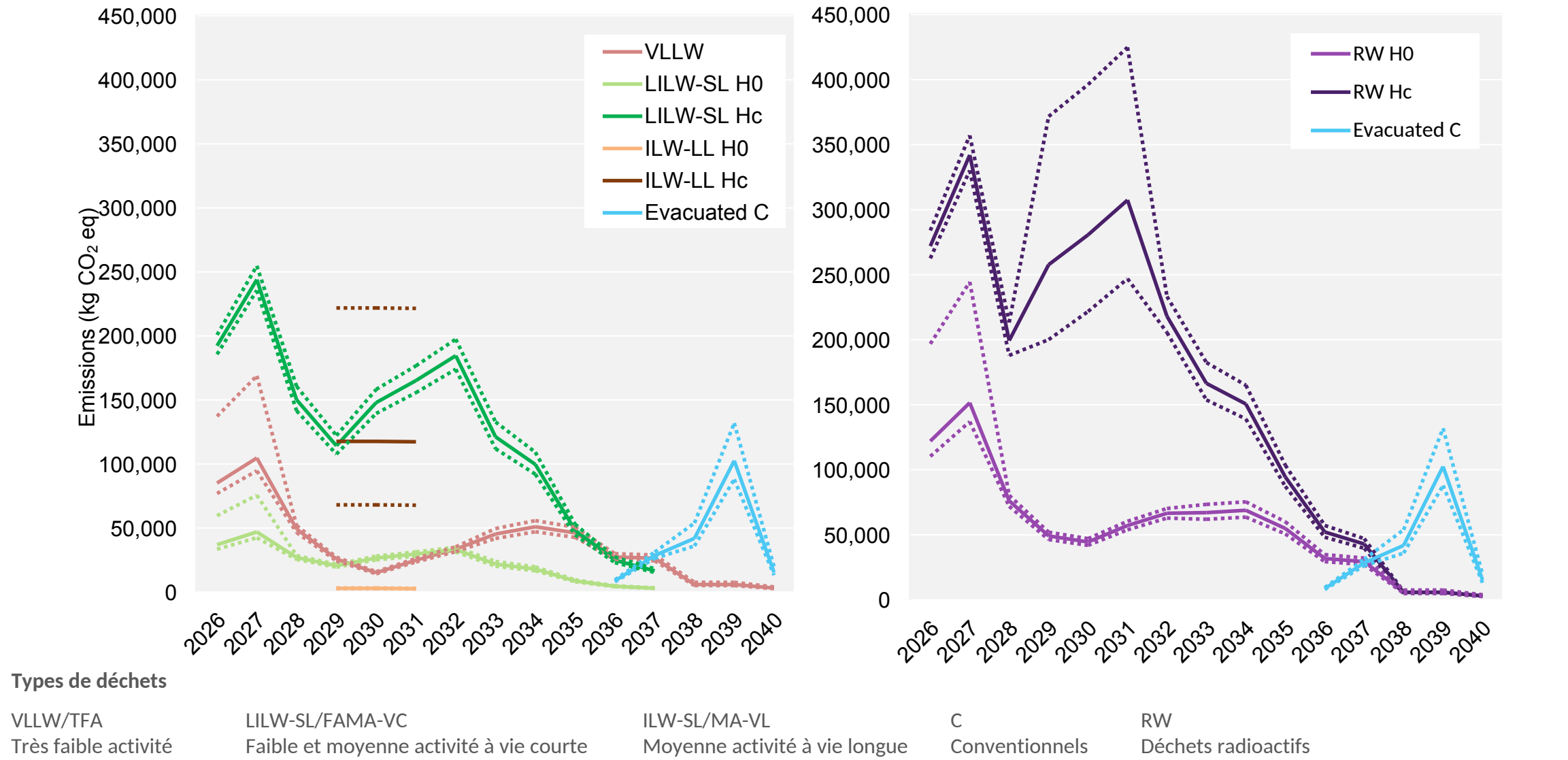
Hc : Transport AVEC cond. supplémentaire



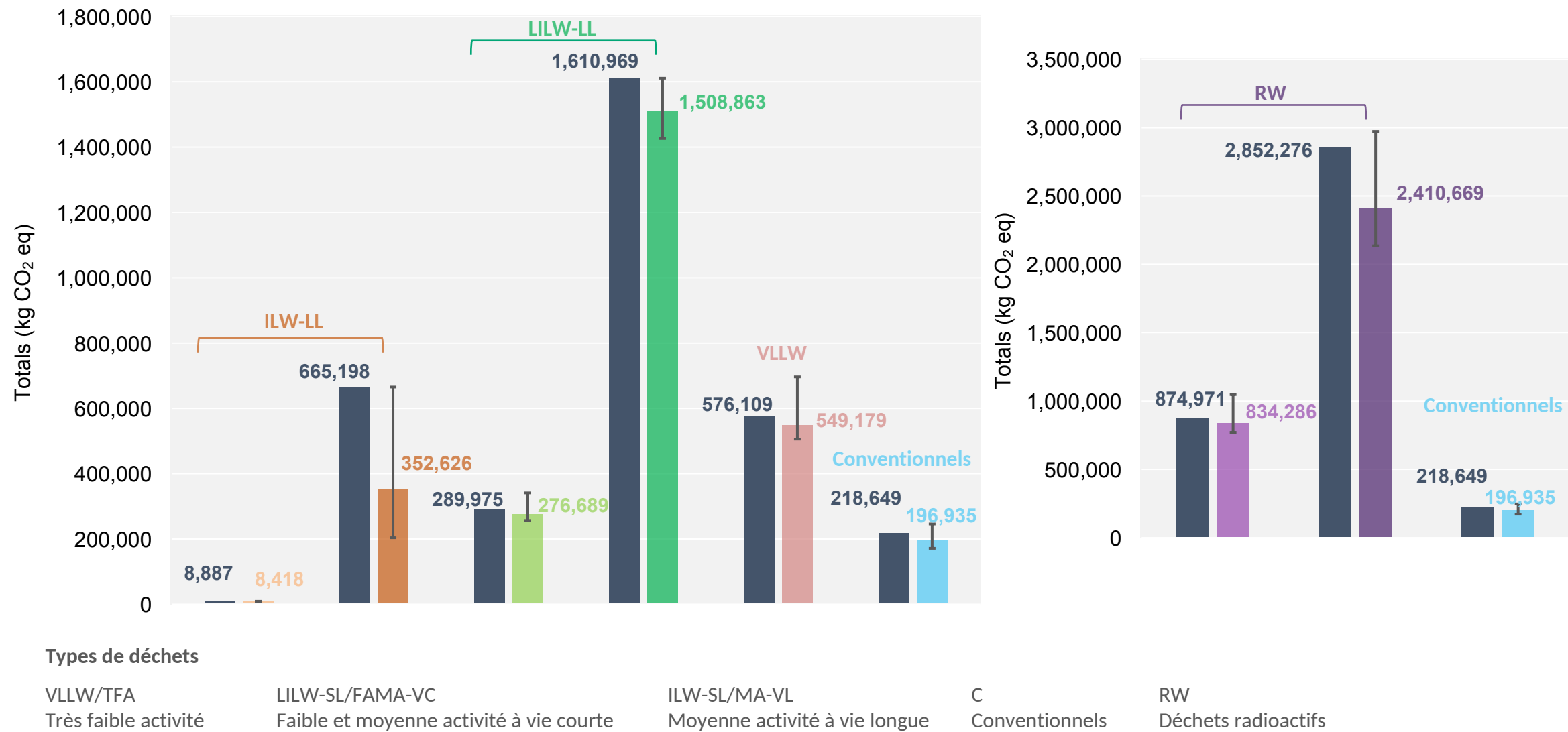
Types de déchets

VLLW/TFA	LILW-SL/FAMA-VC	ILW-SL/MA-VL	C
Très faible activité	Faible et moyenne activité à vie courte	Moyenne activité à vie longue	Conventionnels

4.3.1 Distribution temporelle des émissions



4.3.2 Total des émissions



Merci de votre attention !

Paul Robineau

LASIRE – Laboratoire de Spectroscopie pour les Interactions, la Réactivité et l'Environnement

paul.robineau@univ-lille.fr

Précédemment : IPHC – Institut pluridisciplinaire Hubert Curien

Remerciements

Mehdi Igudier

Maria Boltoeva

Michal Kozderka

Nicolas Arbor

Gaetana Quaranta

Fanny Greulet

Aurélio Labat

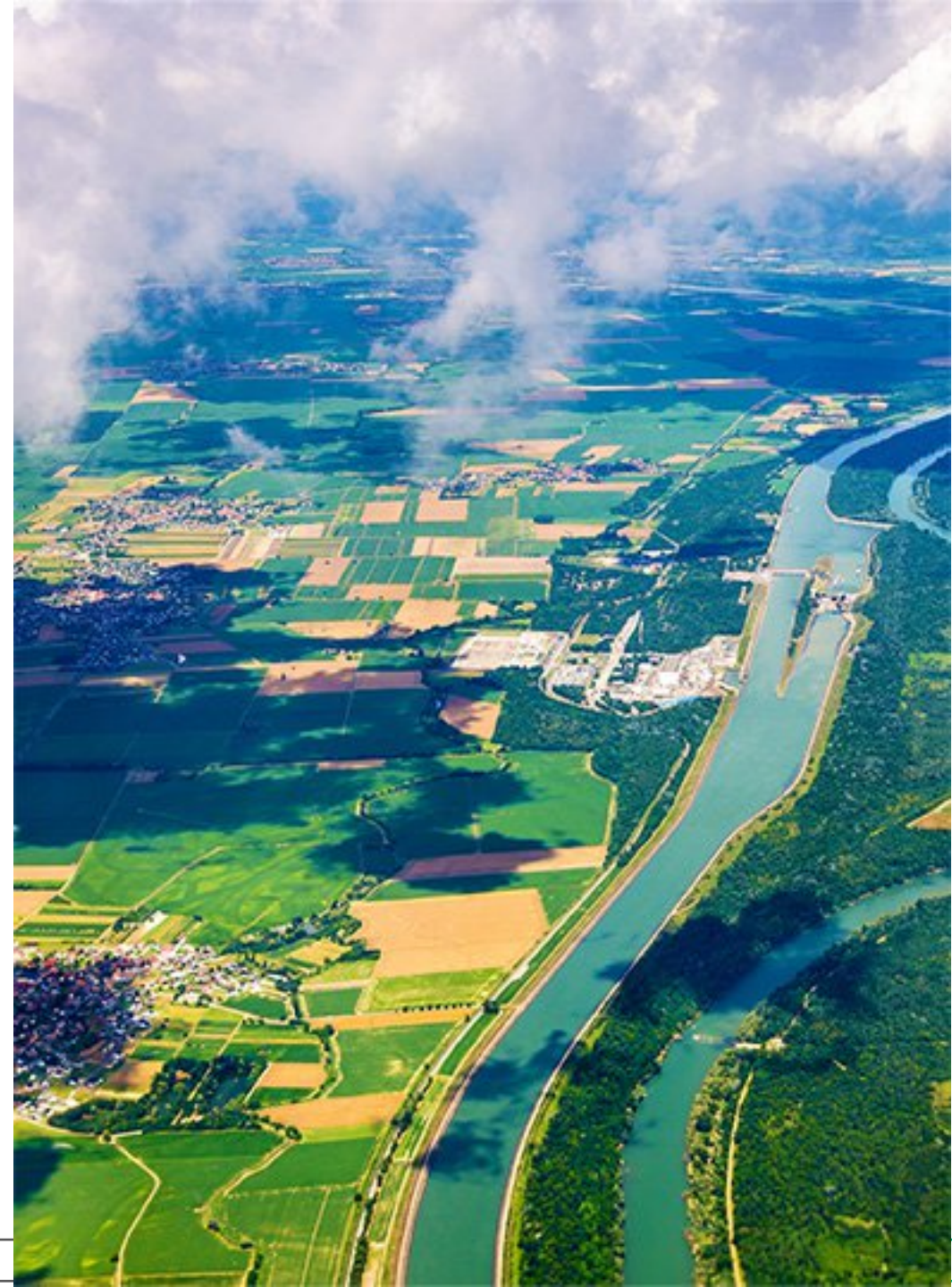
Grégory Hirli

Yannick Beyer



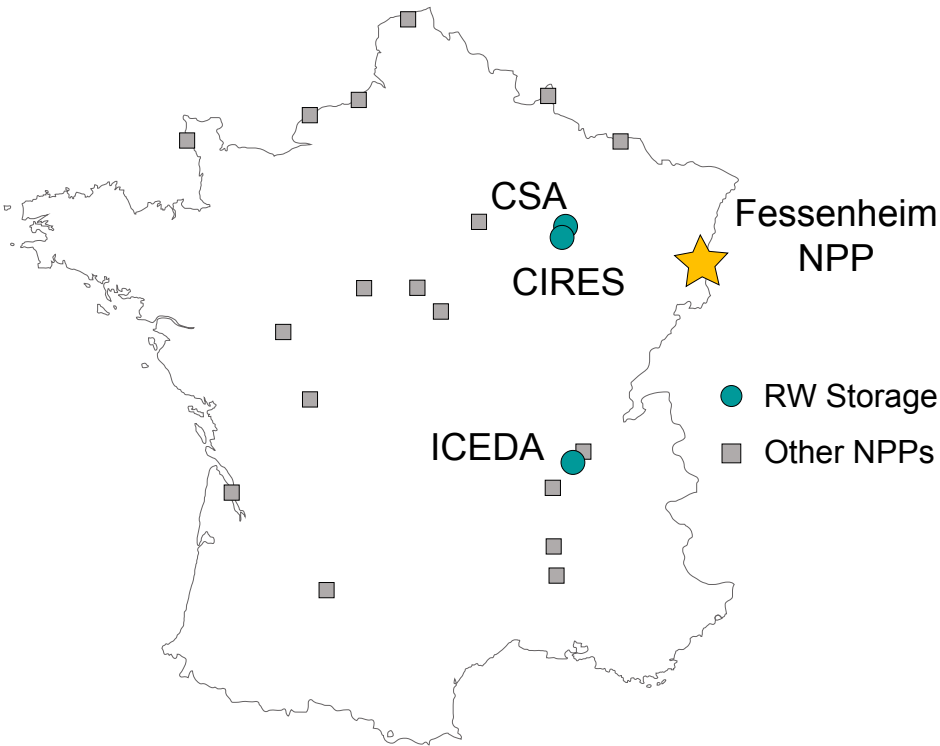
Co-funded by
the European Union

France – Germany – Switzerland (Upper Rhine)



S2.2 Inventaire du cycle de vie

Iguyer M., Robineau P., et al., 2024. Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Int J Life Cycle Assess. 29.7. DOI.



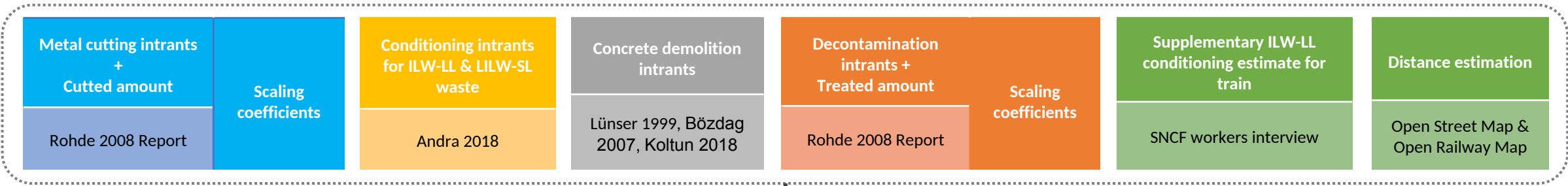
Données Fessenheim

Déchets Conventionnels : « Cernay environnement – Alsadis » (~50 km)

Déchets radioactifs (RW) vers leur site de stockage respectif :

- ILW-LL / MA-VL: train to ICEDA (~400 km)
- LILW-SL / FA-VC: truck to CSA (~300 km)
- VLLW / TFA: truck to CIRES (~300 km)

Littérature scientifique et autres ressources



Processus unitaires

S2.3 Analyse contributive de la découpe de métaux thermique

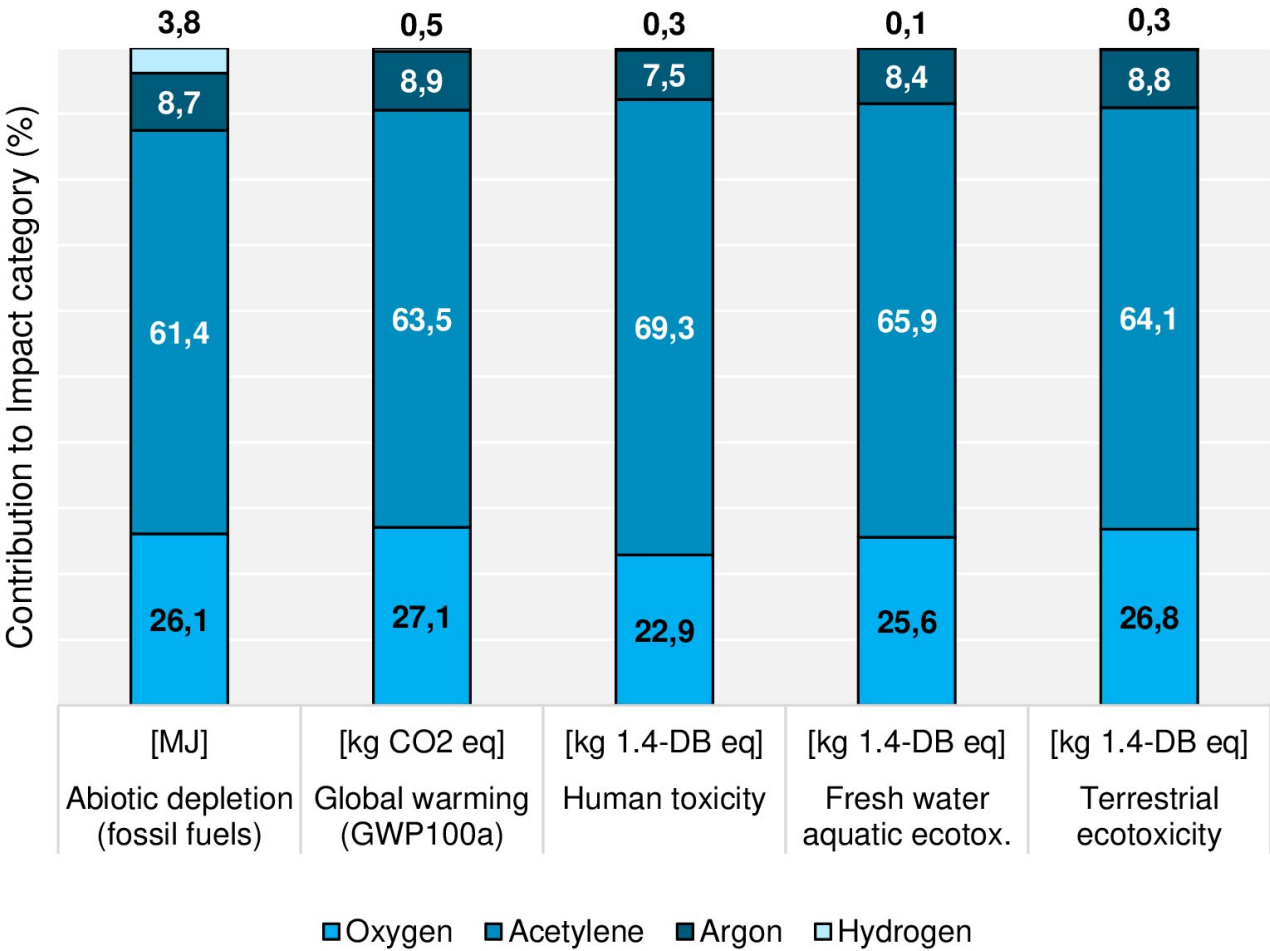
Iguider M., Robineau P., et al., 2024. Life cycle assessment of an upcoming nuclear power plant decommissioning: the Fessenheim case study from public data. Int J Life Cycle Assess. 29.7. DOI.

Pour un postulat de 100% de découpe thermique :

2 méthodes principales :

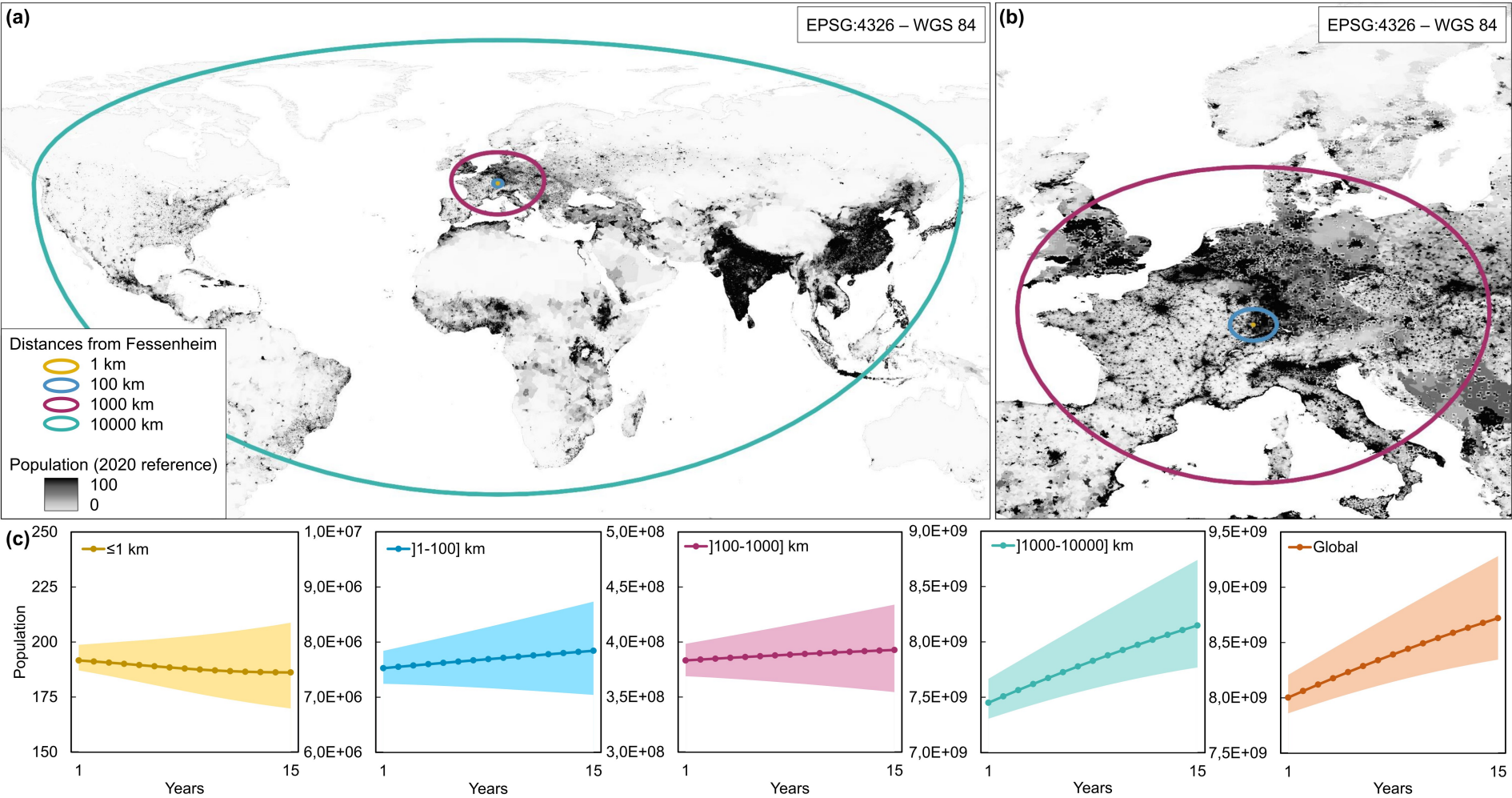
- Oxy-acetylene ≈ 90% des flux
- Plasma ≈ 10% des flux (plus cher, utilisé pour des coupes spécifiques)

On retrouve à peu près ces proportions au niveau des impacts



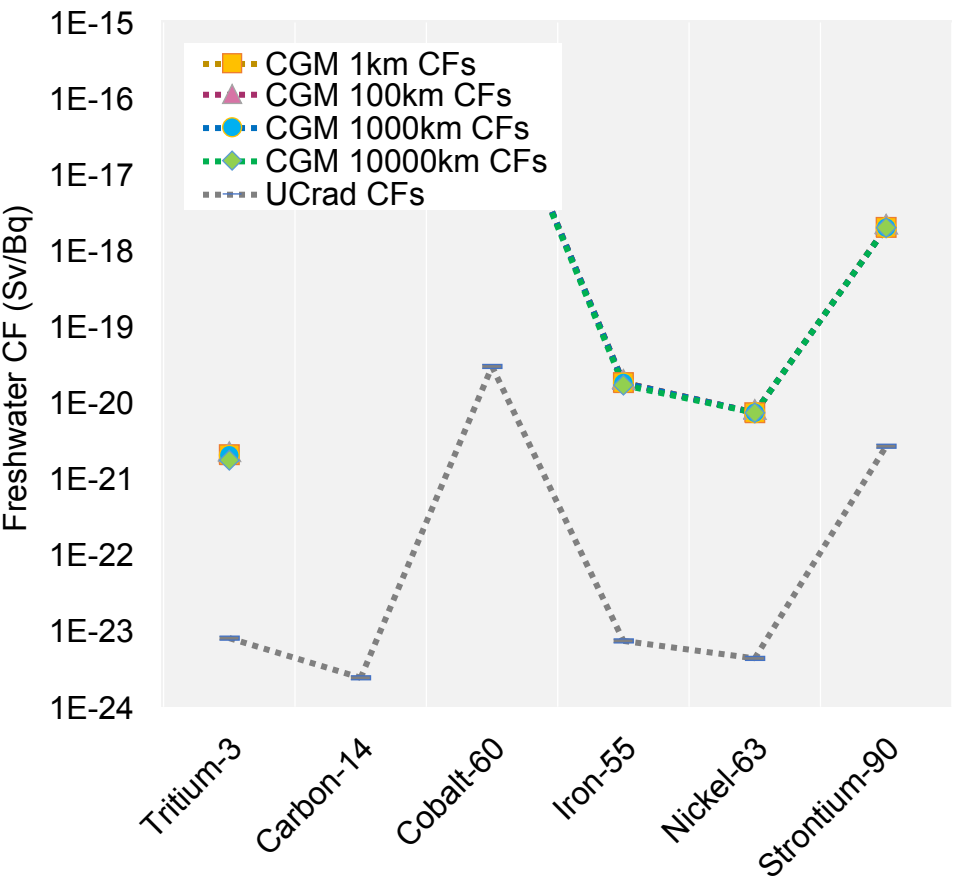
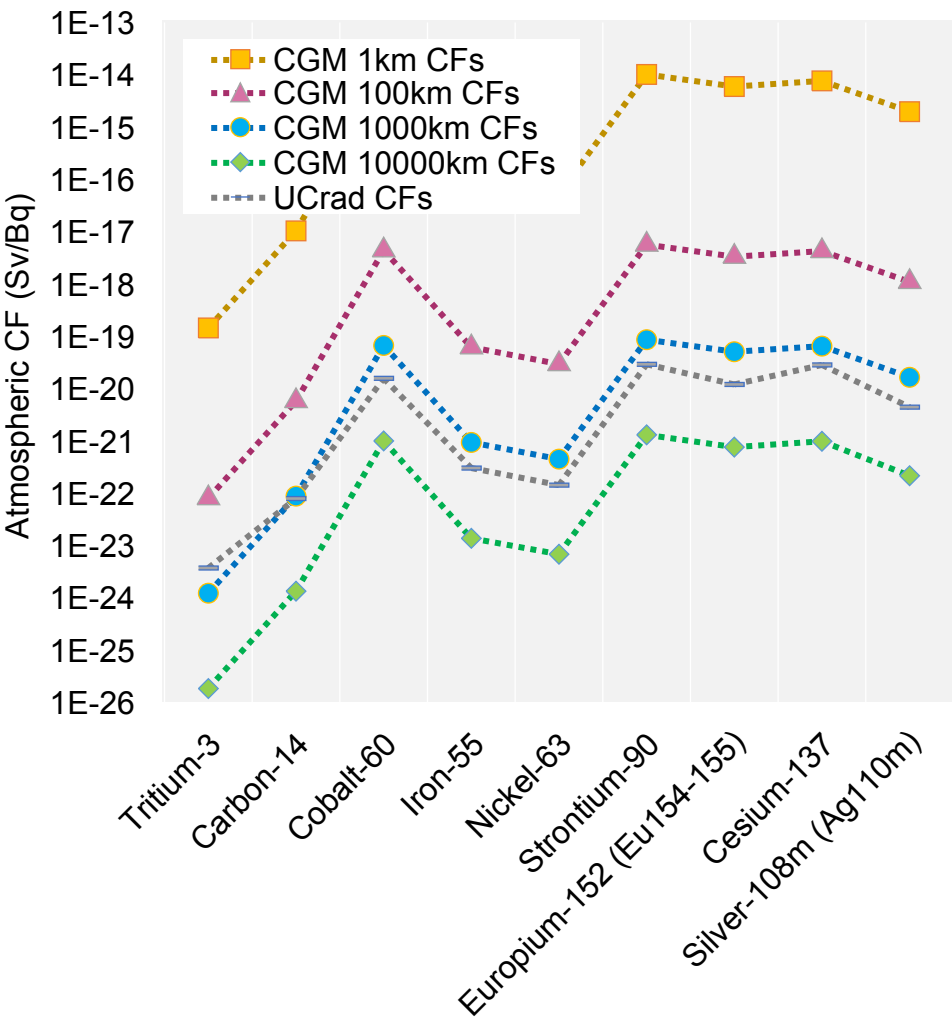
S3.2 Extraction et attribution de scénarios de population

Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.



S3.3 Comparaison des facteurs de caractérisation

Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.



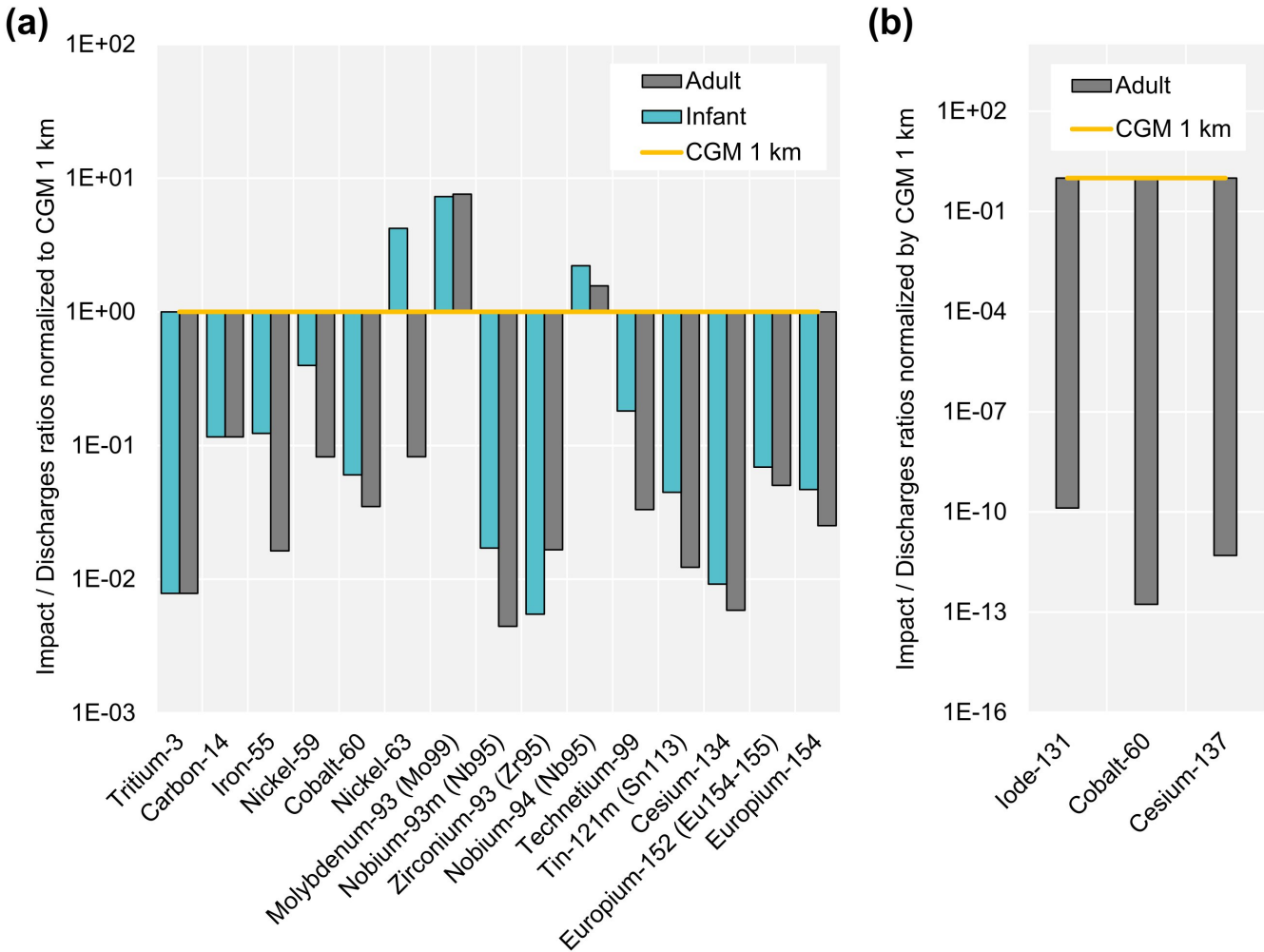
S3.3 Déviations entre ACV (CGM) et études ER

Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.

Exemples de comparaison de ratios
Impacts / Rejets (homogènes à des CFs)
issus d'études ER avec CGM 1 km

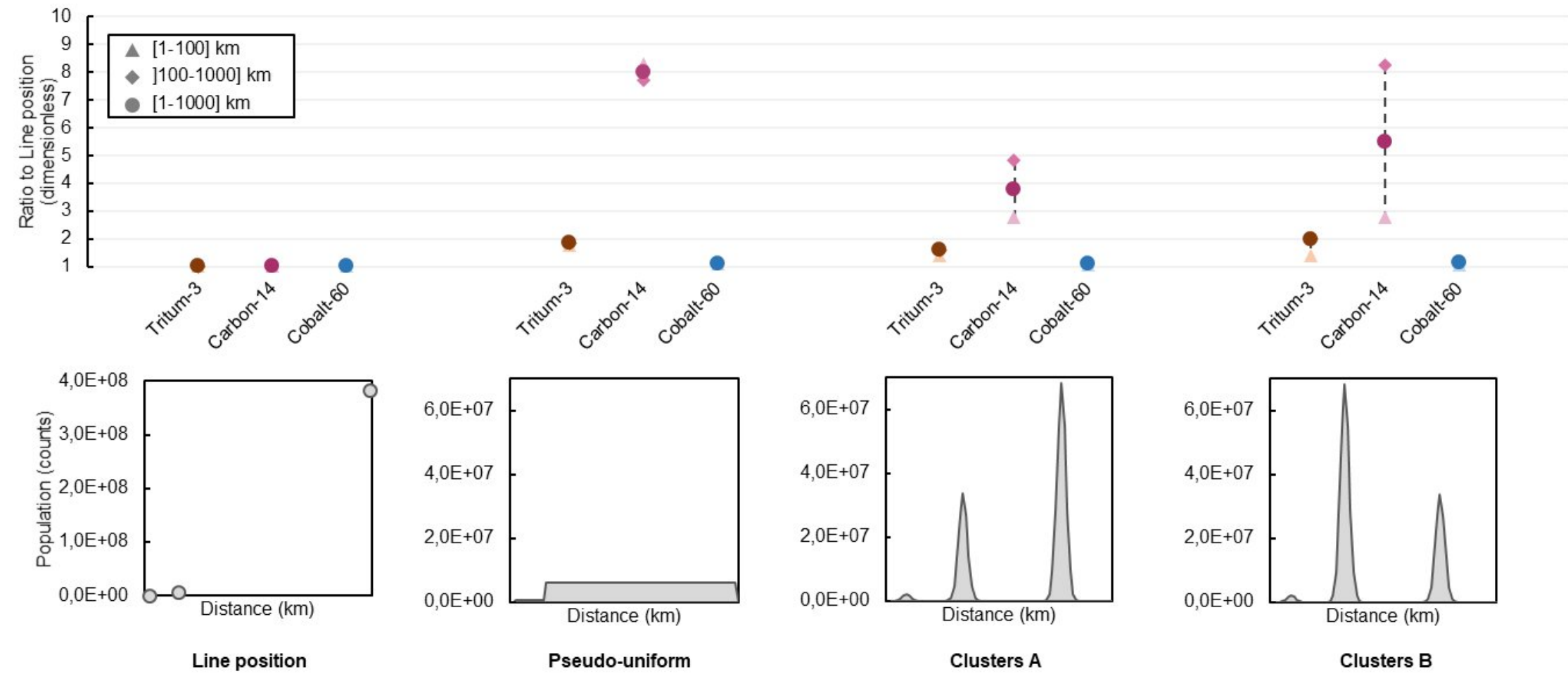
- (a) Rejets atmosphériques
(Subramanian et al. 2020)
- (b) Rejets liquides en eau douce
(Ayoub et al. 2024)

Les entrées entre parenthèses indiquent
le CF de substitution utilisé lorsque nécessaire

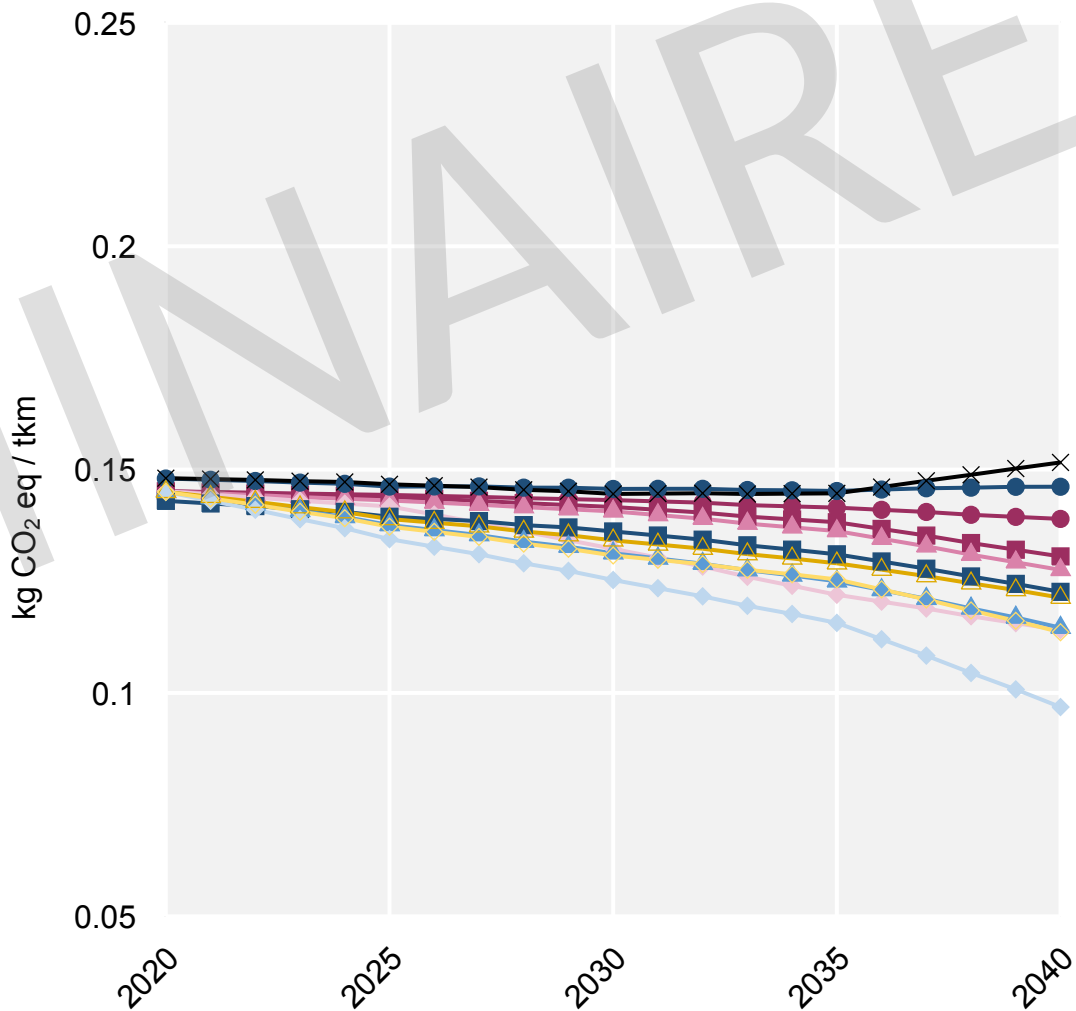
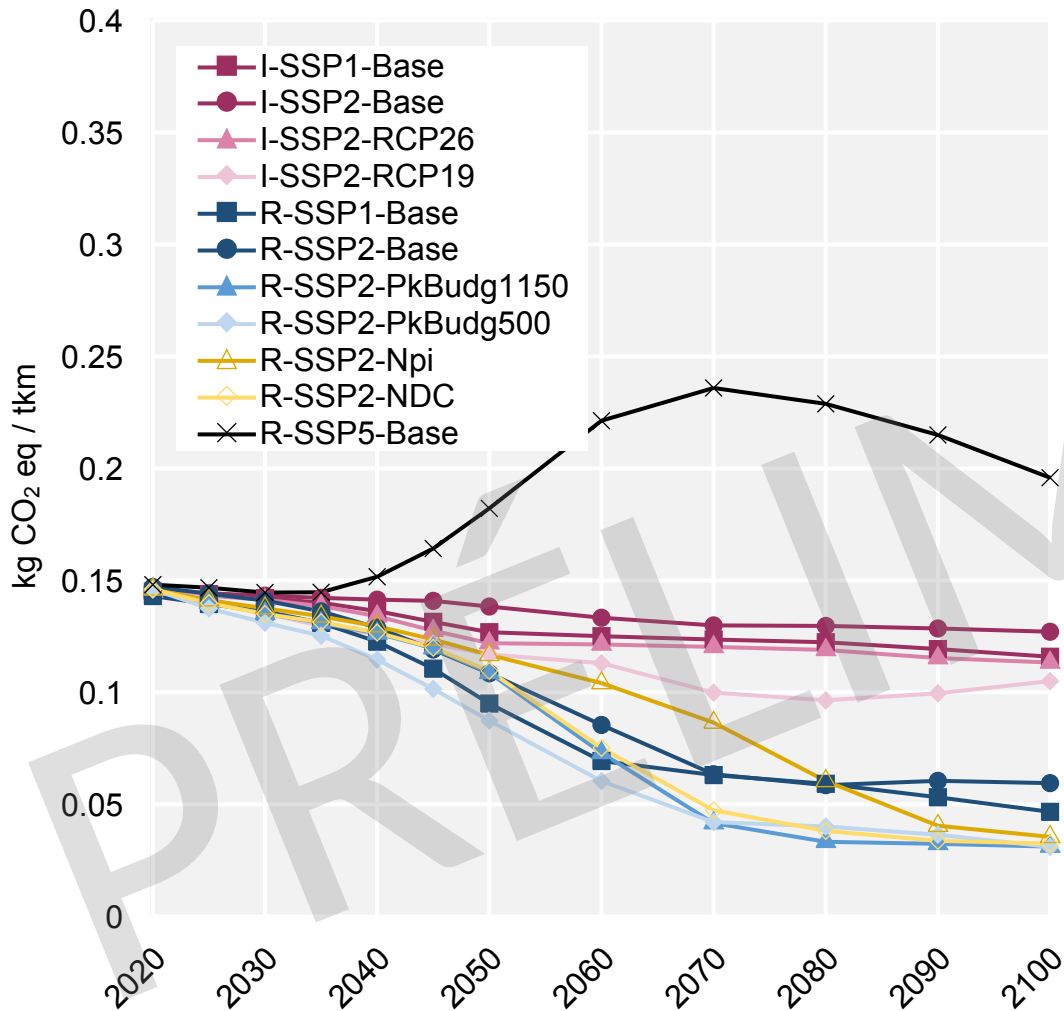


S3.4 Influence des postulats sur la distribution de population

Robineau P., et al., 2025. Radiological Impact of the Fessenheim Nuclear Power Plant Decommissioning Through Prospective Life-Cycle and Risk Assessment Approaches. Sci Tot Env. 974. 179200. DOI.



S4.4 Gammes de scénarios testés



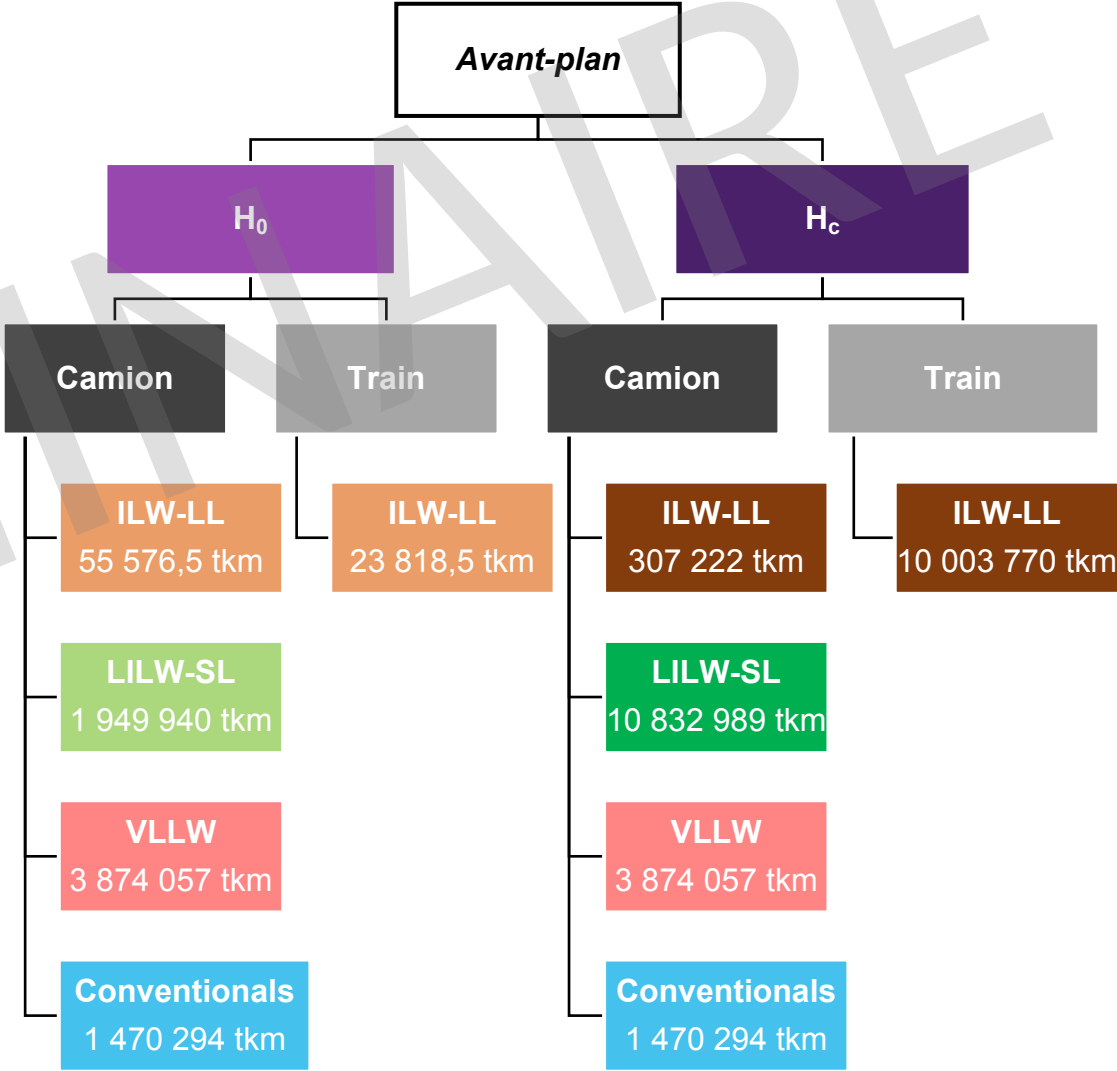
Exemple pour 1 tkm de transport en camion (moyenne zone Europe de l'ouest)

S4.4 Paramètres de système d'avant-plan

Conditionnement pour camion
(Andra 2018)
ILW-LL & LILW-SL
Colisage béton
Masse x 5.55555

Conditionnement pour train
(Andra 2018, données Zwilag)
ILW-LL
Conteneurs Castor + colisage métal
Masse x 420

Distances par rapport à Fessenheim
(Open Street Map)
CIREs : 317 km
CSA : 314 km
ICEDA : 395 km
Cernay-Alsadis : 42 km



S4.4 Le mode de transport des ILW-LL / MA-VL

À masse égale :

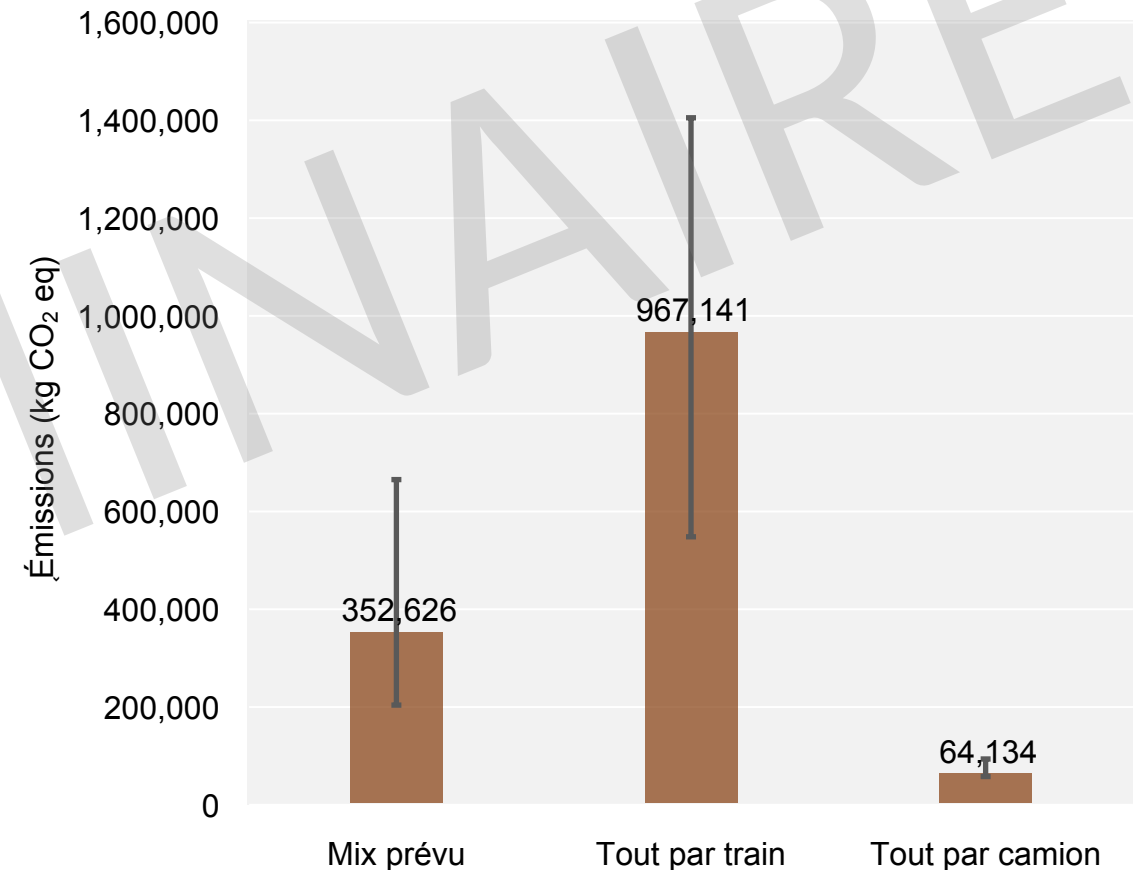
Le transport par train devrait diviser les émissions par 4.6

MAIS

Le conditionnement pour le transport par train peut être 75 fois plus important que le conditionnement pour le transport par camion :

→ Gain d'émissions compensé

ILW-SL/MA-VL
Moyenne activité à vie longue



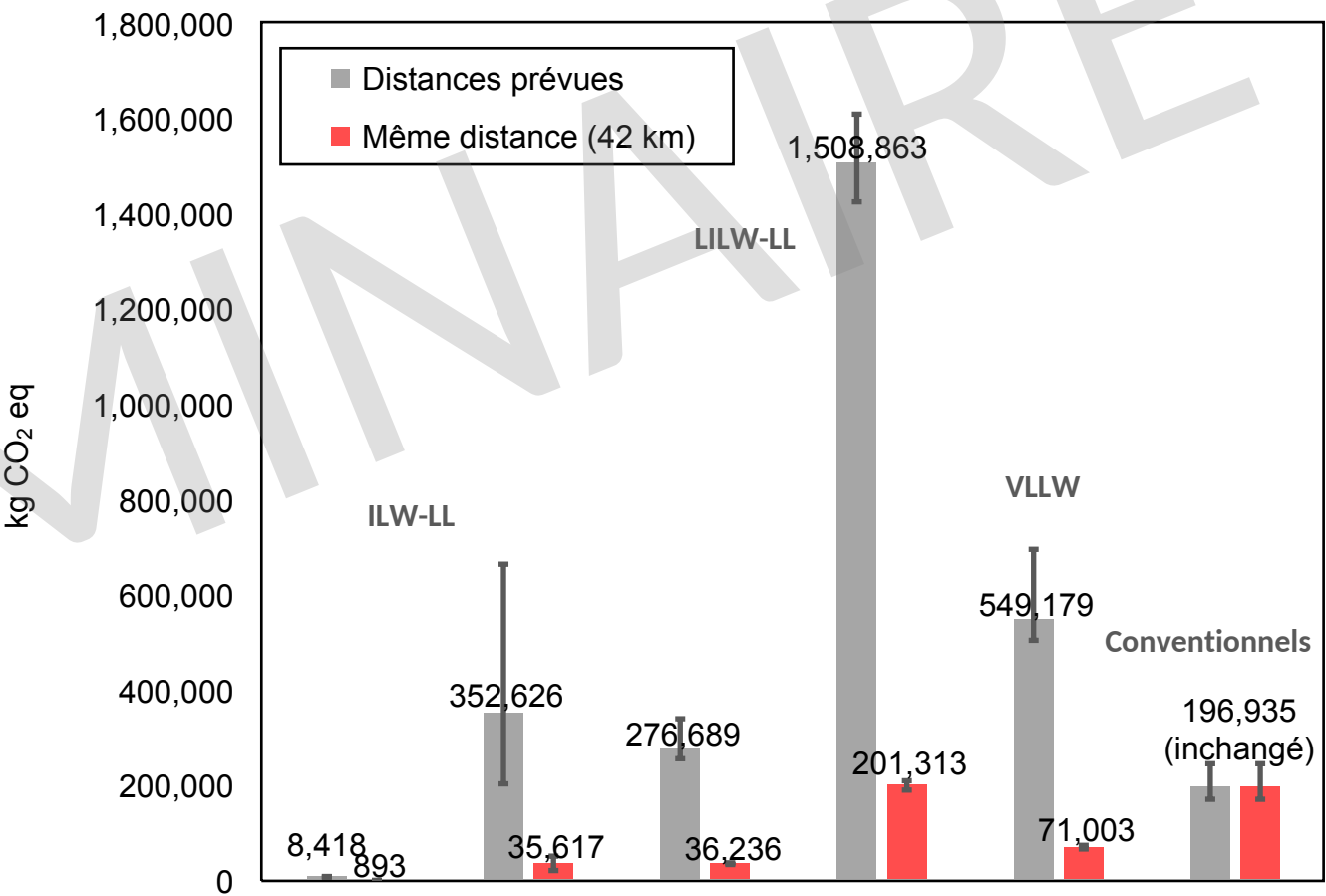
S4.4 Localisation des sites de stockage

Localisation prévue :

Les RW génèrent plus d'émissions malgré la plus grande quantité de déchets conventionnels

Localisation à une même distance (42 km) :

Émissions 7 à 10 fois inférieures
→ H0 : RW < Conventionnels
→ Hc : RW > Conventionnels



Types de déchets

VLLW/TFA
Très faible activité

LILW-SL/FAMA-VC
Faible et moyenne activité à vie courte

ILW-SL/MA-VL
Moyenne activité à vie longue

C
Conventionnels

S4.4 Variations du système d'arrière-plan

Statique (valeurs totales)

= **Dynamique** (valeurs annualisées)

Impacts égaux car combinaison linéaire

(calcul contrôle de l'annualisation de l'inventaire)

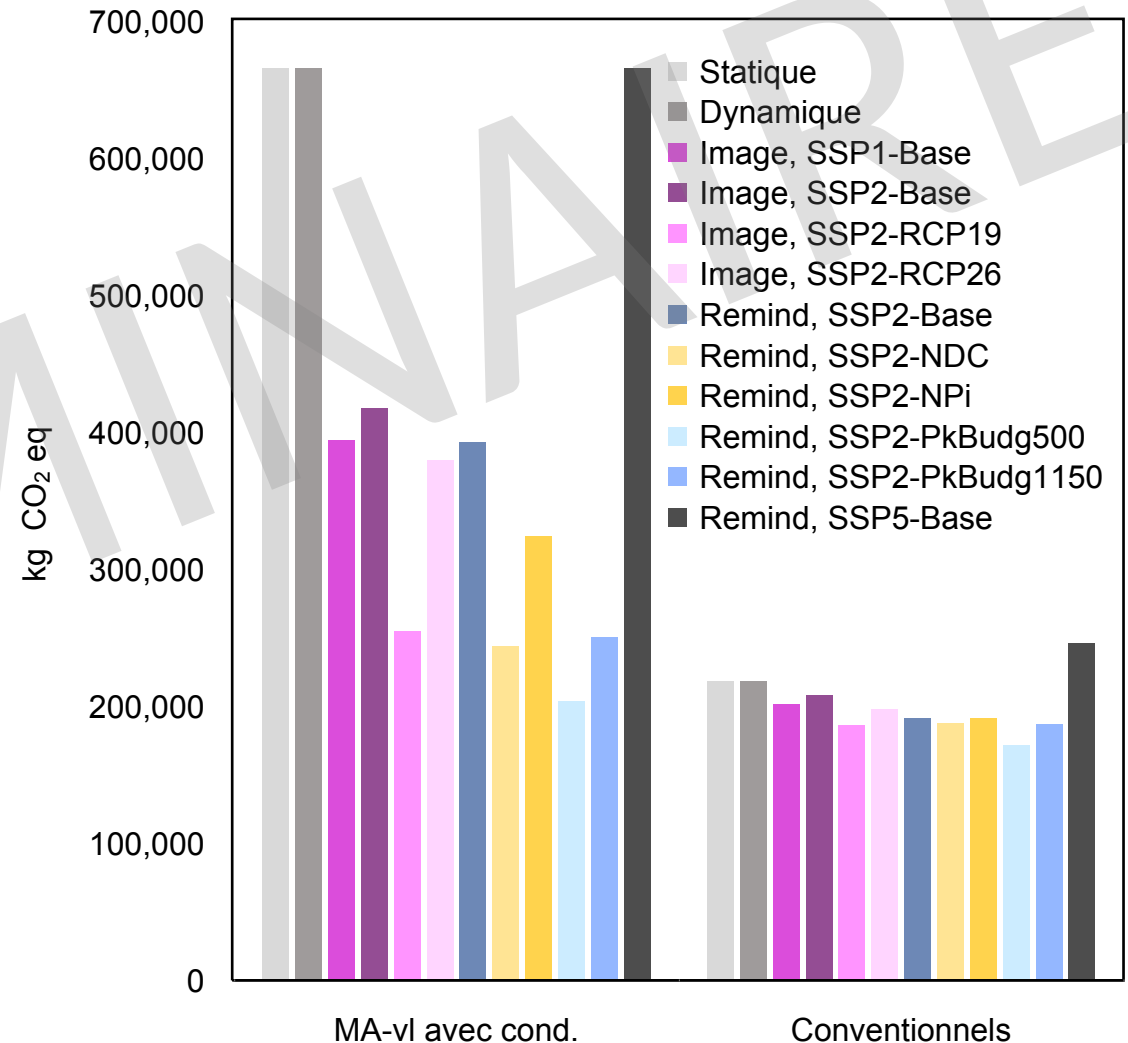
Émissions plus faibles avec prise en compte de l'aspect prospectif sauf pour **SSP5-Base**

Concordance des émissions en fonction du scénario et des contraintes associées

Émissions différentes selon le modèle **IMAGE** ou **REMIND** :

→ Différences d'approches :

- de modélisation
- de méthode de résolution
- de variables clés considérées
- etc...



S4.4 Effet du décalage temporel

