

VII. Rapport du lot de travail no. 7 «Fessenheim»

Membres (ordre alphabétique) :

Nicolas Arbor, IPHC - Université de Strasbourg (coordinateur)
Dominique Badariotti, LIVE - Université de Strasbourg
Frédérique Berrod CEIE - Université de Strasbourg
Maria Boltoeva, IPHC - CNRS
François Chabaux, ITES - Université de Strasbourg
Fanny Greullet, LIVE - Université de Strasbourg
Michal Kozderka, ICube - Université de Strasbourg
Aurélio Labat, IPHC/LIVE - Interreg post-doctorat
Gaetana Quaranta, IPHC - Université de Strasbourg
Benoît Ribon, LIVE & Dynartio
Paul Robineau, IPHC - Interreg post-doctorat
Bertrand Rose, Icube – Université de Strasbourg
Thomas Schellenberger - CERDACC - Université de Haute-Alsace

VII.1. Contexte et objectif

Prendre en charge l'ancien : Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.1.1. L'industrie nucléaire, deuxième source mondiale d'électricité bas carbone, est au centre de controverses ancrées dans des rationalités culturelles opposées (van de Graaff, 2016). Au-delà des débats sur son avenir, l'ancienneté des réacteurs historiques annonce une vague de démantèlements dans les prochaines décennies (IAEA, 2024). Pourtant, la fin de vie des installations industrielles reste peu étudiée, la recherche se concentrant surtout sur la construction et l'exploitation (Invernizzi et al., 2020 ; Invernizzi, Locatelli, Brookes, 2020). Ces lacunes concernent en particulier les connaissances sur les impacts environnementaux (analyse du cycle de vie, LCA) et la législation liée au démantèlement nucléaire.

Les travaux académiques sont fondamentaux pour appuyer les orientations politiques des stratégies de démantèlement des sites nucléaires, en lien notamment avec les questions de recyclage des matériaux et de réutilisation des infrastructures, dans le contexte de transition énergétique d'un territoire nucléarisé comme celui du Rhin-Supérieur. Au sein du lot de travail n°7, nous avons abordé cette problématique sous trois angles complémentaires :

VII.1.1.1. Étude du cadre juridique franco-allemand du démantèlement

L'état du droit est lacunaire. Au niveau européen, le cadre réglementaire du démantèlement est principalement composé de recommandations non contraignantes. En outre, il n'existe pas d'harmonisation entre les États membres de l'UE sur les seuils de libération des matières nucléaires.

Les droits français et allemand du démantèlement sont contrastés. Contrairement à la France, le démantèlement de toutes les centrales nucléaires est une obligation générale en Allemagne. Il existe différentes stratégies de démantèlement reconnues par le droit international. Depuis 2012, le code de l'environnement français impose le démantèlement immédiat (c. env. art. L593-25), mais en Allemagne, la loi sur l'énergie atomique du 22 avril 2002 laisse le choix entre le démantèlement immédiat ou différé. En France, le démantèlement est autorisé par l'Etat central, mais en Allemagne une telle autorisation est accordée par les Etats fédérés. Enfin, la France et l'Allemagne ont des approches radicalement différentes sur la question de la libération des déchets. Le statut existant en droit français de déchet radioactif de très faible activité (TFA) ne connaît pas d'équivalent en Allemagne, où les matériaux très faiblement radioactifs peuvent être plus facilement recyclés.

VII.1.1.2. Analyse du cycle de vie (ACV/LCA) du démantèlement de la centrale de Fessenheim

Jusqu'en 2024, seules deux études ACV académiques portaient spécifiquement sur les impacts environnementaux du démantèlement nucléaire, datant de plus de dix ans

(Wallbridge, Banford, Azapagic, 2013 ; Seier, Zimmermann, 2014). Ainsi, les études ACV du cycle complet de la filière modélisent le démantèlement par analogie avec la construction, un choix supposé mais non validé. En France, le cas du CNPE de Fessenheim, fermé en 2020, présente un intérêt particulier : EDF prévoit jusqu'à 14 démantèlements d'ici 2035. En raison de la standardisation élevée des centrales françaises, fruit d'un programme de construction centralisé (Grubler, 2010), Fessenheim fait ainsi office de « laboratoire » pour les futures opérations. Ce site suscite une forte attention scientifique et sociale, notamment à travers l'Observatoire Hommes-Milieus qui lui est dédié (<https://ohm-fessenheim.fr/>).

Une étude LCA vise à identifier les activités les plus polluantes et à évaluer le recyclage de certains matériaux (vs stockage des déchets) ou la réutilisation d'infrastructures (vs destruction). Le démantèlement de Fessenheim croise ainsi le projet « Technocentre Fessenheim », qui ambitionne de développer en France le recyclage des métaux VLLW. Ces déchets à faible risque sanitaire constituent la majorité, en masse et en volume, des déchets radioactifs produits lors d'un démantèlement. Contrairement à d'autres pays européens appliquant les directives Euratom (1996, 2011, 2014) autorisant le recyclage ou la déclassification de certains VLLW, la France a opté pour un stockage inconditionnel, une décision unique au monde, débattue depuis 30 ans (Martinais, 2021). La saturation annoncée du CIREN a ravivé la question, abordée dans les PNGMDR successifs. Le dernier a conduit à une modification du Code de l'environnement pour encadrer le recyclage des métaux VLLW (PNGMDR, 2022). Le projet Technocentre, en débat public d'octobre 2024 à février 2025, est proposé par EDF comme une solution plus rationnelle de gestion des VLLW et de réutilisation du site (CNDP, 2024). Seules des études LCA prospectives comparant l'ensemble des scénarios de traitement permettront cependant d'en évaluer précisément les coûts/bénéfices environnementaux.

Dans le but d'aider à la décision publique, et compenser l'absence d'obligation légale de publication de ce type d'étude par EDF, nous avons ainsi réalisé une ACV du démantèlement du CNPE de Fessenheim afin d'apporter des éléments de réponses quantitatifs aux questions en lien avec les enjeux du recyclage (versus stockage) des déchets radioactifs.

VII.1.1.3. Vers un Observatoire académique des impacts du démantèlement

Le démantèlement du CNPE de Fessenheim est le premier cas d'une succession à venir pour ce type de centrales. C'est donc une occasion unique d'étudier les impacts socio-écosystémiques d'un tel démantèlement pour en tirer des enseignements, pour monter en compétence et pour mieux anticiper les effets d'un démantèlement sur d'autres socio-écosystèmes.

L'objectif est de rédiger le livre blanc d'un futur observatoire académique des impacts du démantèlement, en bénéficiant notamment du retour d'expérience du projet CO2InnO. Les impacts potentiels étant de natures diverses – depuis les impacts socio-économiques liés à la

fermeture (ex. : emploi) jusqu'aux impacts environnementaux (ex. : pollution chimique) – l'enjeu est de s'appuyer sur une large communauté interdisciplinaire pour les déterminer et développer une méthode de suivi. Il s'agit de :

- définir des indicateurs de suivi des impacts
- cadrer le sujet dans un espace-temps : décrire un Temps-0 à partir duquel lire les reconfigurations dues au démantèlement à différentes échelles
- viser la répliquabilité de la méthode sur d'autres sites à des fins comparatives
- relever les particularismes de chaque situation de démantèlement pour connaître les trajectoires et déterminants propres au cas d'étude (ex. cas de Fessenheim : projet de Technocentre, aspects transfrontaliers)

En parallèle, il faut s'interroger sur les rôles d'un tel observatoire : structuration de la communauté académique, articulation avec les partenaires, politique de gestion des données (acquisition, stockage, accès), animation et lien sciences-société.

Plusieurs acteurs s'intéressent au démantèlement : institutions publiques et privées du nucléaire (ANDRA, ASN, CEA, EDF...), acteurs politiques, associations. Ces acteurs déploient déjà un certain nombre de recherches et de dispositifs. L'enjeu est donc de préciser l'apport spécifique de la recherche académique, en complément de l'existant.

VII.1.2. **Anticiper le nouveau : évaluation d'une solution énergétique basée sur l'hydrogène (H₂)**

À la suite de la fermeture du CNPE de Fessenheim, les États français et allemand, ainsi que les collectivités transfrontalières, ont commandé l'étude « Fessenheim Région Innovation » (EUCOR & URCforSR, 2022). Celle-ci recommande plusieurs projets pilotes pour la transition énergétique régionale, notamment autour de l'hydrogène dans des systèmes décentralisés. L'hydrogène suscite un intérêt croissant, tant pour la décarbonation de sa production industrielle actuelle que pour ses applications dans la mobilité lourde, les réseaux de chaleur ou le stockage intersaisonnier d'électricité. Une divergence stratégique oppose cependant les deux pays : la France, dont le mix électrique est déjà bas carbone, se concentre sur la décarbonation de l'hydrogène industriel, tandis qu'en Allemagne, des intérêts industriels multiples encouragent des usages plus variés (Quitow & Zabanova, 2024).

Le projet transfrontalier CO2InnO évalue l'intérêt de l'hydrogène dans un système énergétique décentralisé, reposant sur un moteur à co-génération, avec des scénarios d'usage définis avec la Stadt Offenburg (Allemagne). L'intérêt de ces solutions doit être analysé selon leur insertion dans la stratégie territoriale, en particulier sous les angles technico-économique et environnemental. L'approche intégrée combinant métabolisme territorial, analyse technico-économique (TEA) et analyse du cycle de vie (LCA) s'impose en recherche pour permettre des évaluations multi-critères situées, mais reste difficile à mettre en œuvre, notamment en

raison du manque d'accès aux données et d'outils opérationnels (Ferdous, Bensebaa, Pelletier, 2023 ; Mahmud et al., 2021 ; Ribon, 2020). De plus, les solutions avancées reposent souvent sur des logiciels propriétaires (Sharma et al., 2023). Le lot de travail n°7 a donc exploré les synergies possibles des outils *open-source* développés dans le cadre de CO2Inno, afin de fournir à la municipalité un outil global permettant de tester différentes configurations énergétiques.

VII.2. Méthodes et matériel :

Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.2.1.1. Analyse juridique

VII.2. Nous nous sommes fondés sur une analyse du droit en vigueur et de la jurisprudence au niveau de l'UE, de la France et de l'Allemagne. Les perspectives juridiques de la réutilisation de l'existant dans le cadre du démantèlement d'une ancienne installation nucléaire ont été évaluées. Les opportunités et les obstacles juridiques liés à la réutilisation des matériaux dans le cadre du démantèlement d'une installation nucléaire ont été recherchés.

VII.2.1.2. Analyse du cycle de vie

À partir des données de déchets par phase du démantèlement issues du plan initial d'EDF (2020), nous avons mené une étude LCA pilote via le logiciel propriétaire Simparo, pour combler les lacunes sur cette phase du cycle de vie d'un CNPE français (Annexes, Figures A.1-4). Pour aller plus loin, un inventaire annualisé des flux a été construit en collaboration avec EDF, à partir du plan de démantèlement mis à jour et de l'étude d'impact réglementaire (EDF, 2024a ; 2024b). L'objectif est de coupler cet inventaire aux méthodes récentes de LCA prospective, qui « futurisent » les bases de données en intégrant des évolutions socio-techniques selon différents scénarios (Arvidsson et al., 2024 ; Sacchi et al., 2022 – Annexes, Figures A.11-12), à l'aide d'outils open source comme Brightway (Mutel, 2017). Par ailleurs, les impacts radiologiques ont longtemps été négligés en LCA par rapport à leur prise en compte dans l'approche HERA (Paulillo et al., 2018). En mobilisant les données d'émissions radioactives de l'étude d'impact du CNPE de Fessenheim (EDF, 2024b), nous avons comparé deux méthodes d'évaluation d'impacts LCA : UCrad, conçue pour des comparaisons globales de technologies, et CGM, plus adaptée à des évaluations spécifiques à un site industriel (Paulillo et al., 2020a ; 2020b ; 2023 – Annexes, Figures A.5-10).

Observatoire des impacts du démantèlement

Pour définir ce que pourrait être un observatoire du démantèlement, nous avons mené une enquête qualitative fondée sur 70 entretiens semi-directifs avec différents types d'acteurs. Nous avons d'abord interrogé des chercheurs ayant collaboré avec l'OHM ou travaillé sur Fessenheim. L'enquête a ensuite été étendue à des chercheurs nationaux et internationaux

impliqués dans les domaines du nucléaire, du démantèlement ou dans des thématiques connexes identifiées au fil des échanges.

Des universitaires engagés dans des réseaux et programmes d'ampleur ont été sollicités (projet DEMAIN, Zone Atelier Territoire Uranifère, Réseau Becquerel...). Nous avons aussi rencontré des représentants d'institutions académiques (CNRS Nucléaire et Particules, CNRS Écologie et Environnement, Labex DRIIHM) pour préciser les stratégies financières et de recherche en cours.

Nous avons interrogé les acteurs du nucléaire (ANDRA, ASNR, EDF), des associations nationales (ANCCLI – Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information –, GSIEN – Groupement de Scientifiques pour l'Information sur l'Energie Nucléaire –, CRIIRAD – Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité) et locales (CLI - Commission Locale d'Information), des acteurs politiques et des techniciens des collectivités et de leurs émanations (communautés d'agglomérations, communes, Agence de Développement d'Alsace (l'ADIRA), Chambre de Commerce et d'Industrie).

La grille d'entretien portait sur les thèmes suivants :

- la présentation de l'enquête (profil, domaines de recherche, lien avec Fessenheim et le démantèlement)
- les indicateurs et données (définition des indicateurs, accessibilité aux données, production de données)
- les collectifs (rôles d'un observatoire, natures des partenariats avec les différentes sphères d'acteurs).

Nous avons complété l'enquête par des visites de sites (CNPE de Fessenheim, site de stockage CIREs de l'ANDRA, Observatoire Pérenne de l'Environnement de l'ANDRA).

Solution énergétique basée sur H₂

VII.2.2.1. Analyse du cycle de vie

Le système énergétique modélisé est décrit dans le rapport du lot de travail n° 2. Nous avons développé un ensemble de scripts *Python*, intégrés dans un *Jupyter Notebook* pour exploiter les résultats en sortie du modèle. À partir des séquences de contrôle du système énergétique, cela nous permet de reconstruire les flux d'électricité, de chaleur et d'hydrogène circulant entre les sous-systèmes, intégrés sur une année complète - Figure VII-1 .

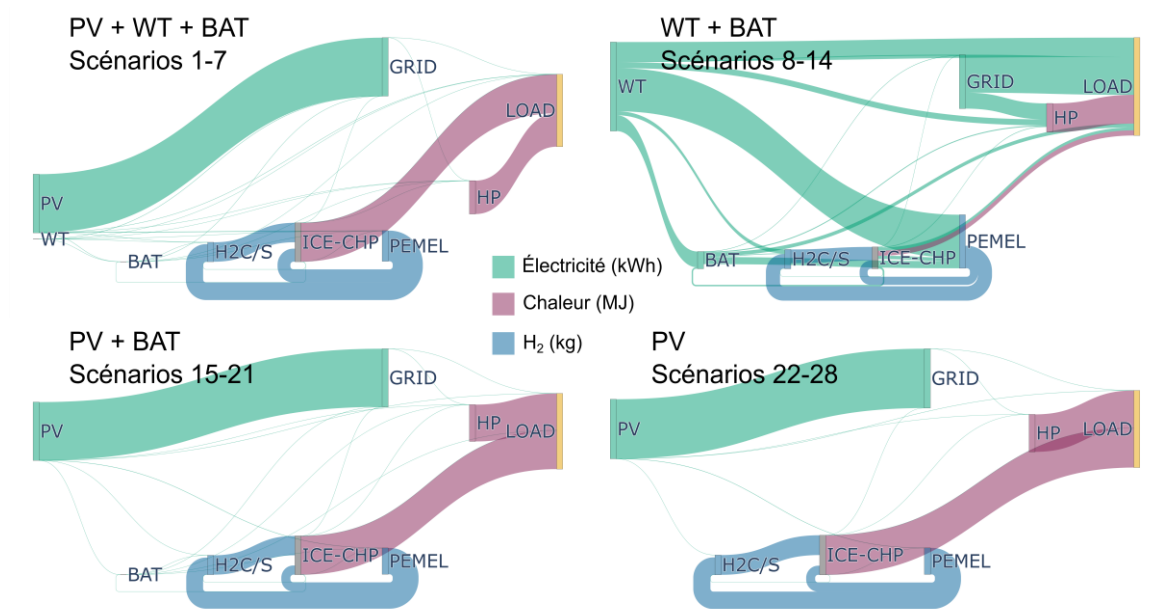


Figure VII-1: Vue d'ensemble de l'équilibre des flux dans le système pour les différentes familles de scénarios, sur la base du cas H2S = 50 m3. La largeur des flux est mise à l'échelle par catégorie de flux afin de rendre plus lisibles les proportions à l'intérieur d'une catégorie donnée. PV: photovoltaïque, WT:éolien, BAT: batterie, ICE-CHP: moteur à combustion interne pour co-génération d'électricité et chaleur, GSHP: pompe à chaleur géothermique, PEMEL: électrolyseur à membrane échangeuse de protons, H2C/S: compression et stockage de H2, LOAD: demande des bâtiments, GRID: réseau électrique.

Ce niveau de détail est essentiel pour des calculs d'impacts environnementaux pertinents en LCA, tout en offrant un éclairage complémentaire sur le modèle TEA développé dans *OpenModelica*, notamment sur les variations de surproduction électrique selon le dimensionnement – Annexes, Figure A.14. Les phases de production et de fin de vie des infrastructures ont été modélisées par mise à l'échelle de sous-systèmes issus de la base ecoinvent (v3.10). La modélisation LCA et les calculs d'impact (LCIA) ont été effectués via Activity Browser (v2.11.1), l'interface du framework open source Brightway2 (Steubing et al., 2020). Les impacts ont été évalués avec la méthode EF (v3.1), recommandée par l'UE, couvrant 16 indicateurs environnementaux (Andreasi Bassi et al., 2023). Nous en avons retenu 5, pour leur pertinence par rapport au système étudié et la clarté de présentation ; ces indicateurs sont détaillés dans l'*VII.1 : Indicateurs environnementaux retenus pour l'évaluation de la solution énergétique basée sur l'hydrogène.*

Tableau VII-1: Indicateurs environnementaux retenus pour l'évaluation de la solution énergétique basée

Catégorie environnementale	Indicateur
Changement climatique	Potentiel de réchauffement global (PRG100)
Écotoxicité : eau douce	USEtox / Ecotoxicité : eau douce (ECOTOX-FW)
Toxicité humaine : cancérigènes	USEtox / Toxicité humaine : cancérigènes (HT-C)
Utilisation des ressources minérales	Potentiel d'épuisement abiotique : réserves ultimes (ADP-UR)
Utilisation d'eau	Potentiel de privation des utilisateurs (UDP-WU)

VII.2.2.2. Approche par le métabolisme territorial

L'approche par le métabolisme territorial étudie les territoires, organisations ou projets à travers les flux d'énergie et de matières qu'ils mobilisent, ainsi que leurs interactions avec le reste du territoire. Cette méthode pluridisciplinaire croise des aspects économiques (valeur des flux), logistiques (infrastructures, transport), géographiques (organisation spatiale, zones de chalandise), écologiques (pollution, ressources), historiques (évolution des volumes) et sociaux (acteurs, orientations politiques) (Athanasiadis, 2025 ; Ribon, 2020). Elle met en lumière les facteurs qui participent à l'ancrage territorial des acteurs et projets, et aide à élaborer des scénarios de développement durable.

La notion de métabolisme territorial peut ainsi être utilisée comme une grille d'analyse systémique et systématique, interrogeant les flux, leurs caractéristiques et leur contexte. Elle a été utilisée dans ce sens pour questionner le projet de cogénération (CHP).

Ces études nécessitent un fort besoin en données et une bonne maîtrise de la chaîne d'information pour soutenir des stratégies territoriales. Pour y contribuer, nous avons inventorié les jeux de données disponibles sur l'énergie et la mobilité dans le Rhin-Supérieur, et développé une plateforme de visualisation large public basée sur la librairie open-source *Sinamet* (Ribon 2018). Cette plateforme structure et analyse les données de flux selon des dimensions temporelles, spatiales, quantitatives et qualitatives, rendant l'information territoriale plus accessible de façon visuelle. Ce travail a également enrichi le lot 3 du projet, dédié à la mobilité durable et aux infrastructures de recharge.

VII.3. Résultats

Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.3.1.1. Cadre juridique

VII.3.1.1.1. Les possibilités de réutilisation de l'existant dans le démantèlement d'une installation nucléaire

^{VII.3.1} La réutilisation s'inscrit dans le prolongement du principe de prévention, et elle est en adéquation avec le droit des déchets qui prévoit de « donner la priorité à la prévention et à la réduction de la production de déchets » (c. env. art. L541-1). En droit, il existe un lien direct entre le principe de prévention, la réutilisation et la préservation des ressources, ce qui est favorable à la réutilisation de l'existant.

La réutilisation s'inscrit également dans le droit des installations nucléaires. Parmi les règles relatives au démantèlement et au déclassé des installations nucléaires de base (INB), il n'existe pas d'obligation de détruire les bâtiments d'une installation nucléaire en démantèlement. La réutilisation d'un ancien bâtiment peut être envisagée dans le plan de démantèlement d'une installation nucléaire si elle présente plus d'avantages que de risques (Russo, 2024).

L'impératif de maîtrise des risques constitue cependant un frein à la réutilisation de certains éléments d'une ancienne installation nucléaire. Or, le choix de conserver un bâtiment peut engendrer un risque supplémentaire en cas de radioactivité cachée ou oubliée. Le code de l'environnement prescrit en outre le démantèlement immédiat (c. env. art. L593-25), ce qui peut constituer un frein à la réutilisation, car la préparation d'un bâtiment en vue de sa réutilisation peut être plus longue à mettre en œuvre qu'une démolition.

Conclusion. L'affectation des bâtiments d'une ancienne installation nucléaire à un nouvel usage est possible si elle n'engendre pas en elle-même un risque trop élevé, et si elle peut être menée à bien avec un coût et dans un délai raisonnables.

VII.3.1.1.2. Le recyclage des déchets très faiblement radioactifs : un rééquilibrage entre prévention des risques et préservation des ressources

Le projet de Technocentre envisagé par EDF sur le territoire de Fessenheim (recyclage des matières très faiblement radioactives (TFA) issues notamment d'installations nucléaires démantelées) s'accompagne d'une évolution du droit visant un nouvel équilibre entre prévention des risques et préservation des ressources.

Le problème des déchets TFA au regard du droit français. En France, un déchet est présumé être radioactif à partir du moment où il a été produit dans une zone à production possible de déchets nucléaires (Louis, Deproit, 2018). Ce critère spatial (Martinais, 2021) est le plus exigeant du point de vue de la prévention des risques, mais il a l'inconvénient de générer d'importants volumes de déchets.

L'évolution du cadre juridique en vue du recyclage des déchets TFA. Les décrets n°2022-174 et n°2022-175 adoptés le 14 février 2022 prévoient l'instauration d'un régime dérogatoire au sein du CSP, permettant à l'administration d'autoriser, au cas par cas, la valorisation dans l'industrie conventionnelle de matières TFA issues de l'industrie nucléaire.

La validation de ce cadre juridique dérogatoire par la justice. Ce nouveau régime a été validé par le Conseil d'Etat le 27 mars 2023, sur le fondement du principe de justification, affirmant ainsi l'intérêt de la réutilisation des matières, et donc de la préservation des ressources, au nom de l'économie circulaire (Conseil d'Etat, 27/03/2023, *Réseau sortir du nucléaire*, n°463186).

En droit, la réutilisation de matières ne peut cependant être effectuée au détriment de la maîtrise du risque radioactif. C'est pourquoi le nouveau régime définit les modalités de contrôle des matières radioactives TFA à l'entrée et à la sortie du futur site de valorisation, les seuils maximums de radioactivité des matières recyclées et les limites d'exposition des personnes, ainsi qu'une obligation de traçabilité des matières valorisées sortantes (CSP art. R1333-6-3).

VII.3.1.2. Analyse du cycle de vie

Les activités sur site (démantèlement électromécanique, assainissement, démolition) et les transports de déchets ont été évalués séparément pour isoler le cas des déchets radioactifs. Bien qu'ils ne représentent que 5 % de la masse totale, l'impact des déchets radioactifs est 1,8 à 6,6 fois supérieur à celui des déchets conventionnels – Annexes, Figures A.3. Cela s'explique par leur conditionnement spécifique, qui alourdit les charges transportées, et par les longues distances imposées par la législation : VLLW vers le CIREN (~300 km), ILLW-SL vers le CSA (~300 km), ILW-LL vers l'ICEDA (~400 km).

Contrairement aux études précédentes, nous avons analysé en détail les contributions aux impacts des activités sur site, révélant le rôle majeur de la découpe des métaux – Annexes, Figure A.2. Initialement modélisée à 100 % par découpe thermique (oxygène et acétylène), elle représente entre 62,6 % et 99,5 % des impacts selon la catégorie environnementale – Annexes, Figures A.4. Ce point chaud prioritaire peut être atténué : notre étude de sensibilité (Figure VII-2) montre qu'un remplacement de 50 % par découpe mécanique réduit les impacts de 45 à 48 %, et un passage total à la découpe mécanique diminuerait les impacts de 89 à 96 %.

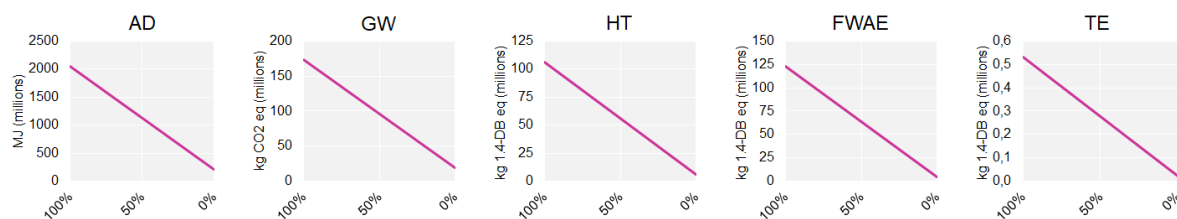


Figure VII-2: Figure de la diminution des impacts (toute catégorie évaluée) avec le remplacement de la découpe des métaux thermique par de la découpe mécanique. Les pourcentages en abscisses représentent la part de découpe thermique. Indicateurs : (AD) abiotic depletion, fossil fuels; (GW) global warming; (HT) human toxicity; (FWAE) freshwater aquatic ecotoxicity; (TE) terrestrial ecotoxicity.

Concernant les impacts radiologiques, l'VII-3, synthétise les deux aspects de ce travail.

- La comparaison des résultats et l'interprétation de leurs différences au niveau *du point médian* – risque, en Sievert (Sv)
- La mise en évidence de la nécessité d'une modulation dynamique des facteurs de caractérisation au niveau *endpoint* – dommage, en Disability-Adjusted Lost Years (DALYs)

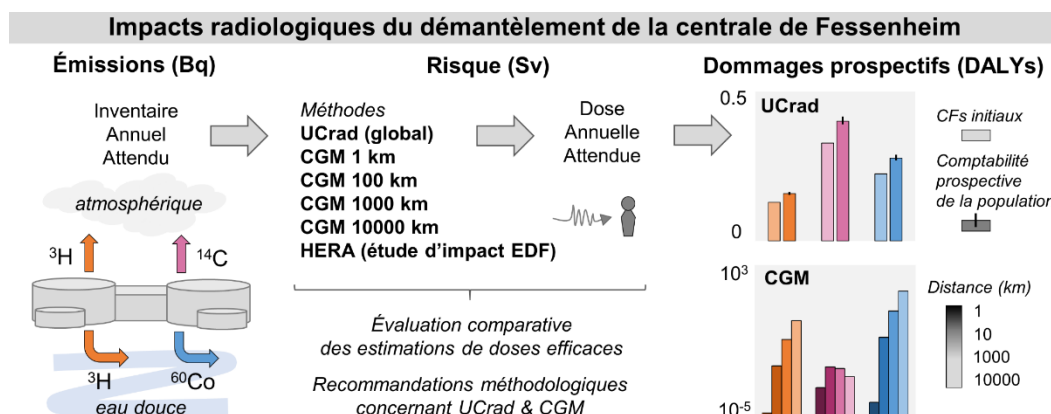


Figure VII-3: Résumé graphique de l'étude comparée de l'impact radiologique sur la santé humaine lors du démantèlement de la centrale de Fessenheim.

Au niveau midpoint, la méthode CGM surestime systématiquement les impacts, avec CGM 1 km donnant des résultats 6,5 fois supérieurs à l'étude HERA d'EDF, plus située (Annexes, Figures A.6-7). Environ 40 % de cet écart vient du traitement de la distance émission-exposition, HERA évaluant l'impact sur la population locale à 2-3 km du CNPE. Malgré cela, CGM 1 km estime un risque total de 11 μ Sv, soit 400 fois inférieur à l'exposition annuelle moyenne en France (4,5 mSv) (IRSN, 2021). Les deux méthodes LCA et l'approche HERA identifient les mêmes radionucléides majeurs (Tritium-3, Carbone-14, Cobalt-60), avec des contributions variables selon la modélisation du devenir des radioinucléides post-émission (Annexes, Figure A.9).

Au niveau endpoint, nous montrons que pour une activité longue comme le démantèlement nucléaire (15 ans minimum), il est crucial de prendre en compte la variation temporelle de l' s

populations exposées – Annexes, Figure A.8. Ce résultat a une portée méthodologique générale, car toutes les méthodes LCIA de santé humaine partagent un formalisme similaire. Nous avons comparé plusieurs hypothèses de distribution de population (Annexes, Figure A.10) et proposé d'utiliser des facteurs de caractérisation spatiaux continus comme solution potentiellement plus pertinente. La base de données associée est disponible en annexes dans les articles publiés.

VII.3.1.3. Observatoire des impacts du démantèlement

En général, l'enquête de caractérisation d'un observatoire des impacts du démantèlement révèle un intérêt partagé pour l'interdisciplinarité, la mise en lien entre chercheurs, la mise en lien avec d'autres sphères d'acteurs, la visibilisation des travaux de recherche, l'accompagnement à la recherche de financements et l'accès à des données et informations. Deux idées fortes ressortent de l'enquête, que nous détaillons ci-dessous :

- des « domaines » de recherche (Bimbaum *et al*, 2025) autour desquels organiser la communauté
- favoriser l'accès aux données existantes plutôt que produire de nouvelles données

VII.3.1.3.1. Les domaines de recherche

Nous identifions 5 grands « domaines », perméables les uns aux autres, qui mobilisent chercheurs et autres acteurs autour du démantèlement :

- Domaine des « Impacts socio-territoriaux » (où l'on retrouve les préoccupations liées au métabolisme territorial, l'évaluation des politiques publiques, l'étude de la fiscalité locale...)
- Domaine de la « Santé » (depuis la sociologie du travail dans un contexte d'incertitude et d'exposition aux radiations et aux pollutions, jusqu'à l'étude des pollutions chimiques et radioactives dans l'environnement)
- Domaine « Mémoires et Patrimonialisation » (des mémoires dans l'organisation du travail pour favoriser l'ergonomie du démantèlement aux mémoires militantes)
- Domaine des « Techniques du démantèlement » (dont LCA, comparaison de méthodologies de mesure de la radioactivité en contexte de démantèlement)
- Domaine des « Endings » : réflexions transversales sur la fin des organisations, les héritages, la gestion des « communs négatifs » (Joly, Barbier et Turnheim, 2022 ; Landivar, Bonnet et Monnin, 2021)).

VII.3.1.3.2. Les données : accessibilité et production

Le suivi des variables et la gestion des données est un sujet que nous avons longuement abordé dans notre enquête. Un observatoire peut avoir pour mission d'identifier un certain nombre d'indicateurs à renseigner pour caractériser des phénomènes dans le temps, ici des s

impacts de démantèlement. Deux approches complémentaires se rencontrent : exploiter des données existantes et produire de nouvelles données. L'enquête révèle que les besoins se situent en priorité dans l'accessibilité aux données existantes plutôt que dans l'acquisition de nouvelles données.

Les chercheurs expriment en effet un besoin de facilitation d'accès aux données produites et détenues par d'autres acteurs. Il peut s'agir de données acquises par des acteurs qui veulent éviter leur diffusion (ex : des données EDF pouvant améliorer la précision des modèles LCA) ou de données publiques mais dont l'accès est difficile pour les personnes non-spécialistes (ex. : données foncières du CEREMA). Ces deux types d'obstacles (rétention et complexité) peuvent être levés en déployant les outils adéquats. Ainsi, en première intention, tout acteur pourrait se tourner vers l'observatoire des impacts du démantèlement pour faciliter l'accès à des données qu'il ne possède pas.

Pour le problème de la rétention, il est possible de le dépasser partiellement en développant une acculturation réciproque entre des acteurs de différentes institutions, en favorisant notamment la communication sur les travaux de recherche en cours et l'expression des besoins. Pour le problème de l'accès complexe à la donnée, il est possible de développer une ingénierie interne à l'observatoire. La mission consisterait à recenser les données disponibles, les opérateurs qui les produisent et les conditions dans lesquelles ces données peuvent être mobilisées par la communauté académique et les autres acteurs. Un rapprochement est possible avec les infrastructures de recherche (IR) dédiées (ex. : IR* PROGEDO pour les données INSEE), avec les institutions publiques et parapubliques (ex. : Chambres consulaires), avec les observatoires thématiques (ex. : AtmoGrandEst pour les données du compartiment Air) et les laboratoires en métrologie (ex. : le LEREN – Laboratoire d'étude et d'expertise sur la radioactivité de l'environnement – de l'ASNR).

Plusieurs personnes interrogées évoquent également un travail de collecte de mémoires qui pourrait prendre la forme d'une « Archive de Mémoires ». L'objectif serait de stocker tous types de mémoires (avant qu'elles ne disparaissent) sous la forme de discours audio et/ou retranscrits pour différentes formes d'analyses futures, quantitatives et qualitatives. C'est un exemple de sujet pour lequel il faut de l'ingénierie et un accompagnement de services dédiés (ex. : services CNRS), et autour duquel pourrait se mobiliser la communauté qui s'y intéresse dans le cadre de discussions collectives.

Solution énergétique basée sur H₂

VII.3.2.1. Analyse du cycle de vie

L'outil open source de construction et visualisation des flux est accessible sur GitHub. La visualisation des scénarios de cette étude est intégrée sur une page dédiée du site CO2InnO.

Tous les résultats LCIA sont aussi consultables via un Jupyter Notebook mis à disposition — voir Annexes.

LaVII-4 synthétise les résultats des impacts calculés pour les différents scénarios. On rappelle que les capacités de stockage en H₂ à l'intérieur de chaque famille de scénario évoluent selon ces valeurs : [1000, 500, 100, 50, 30, 10, 1] m³.

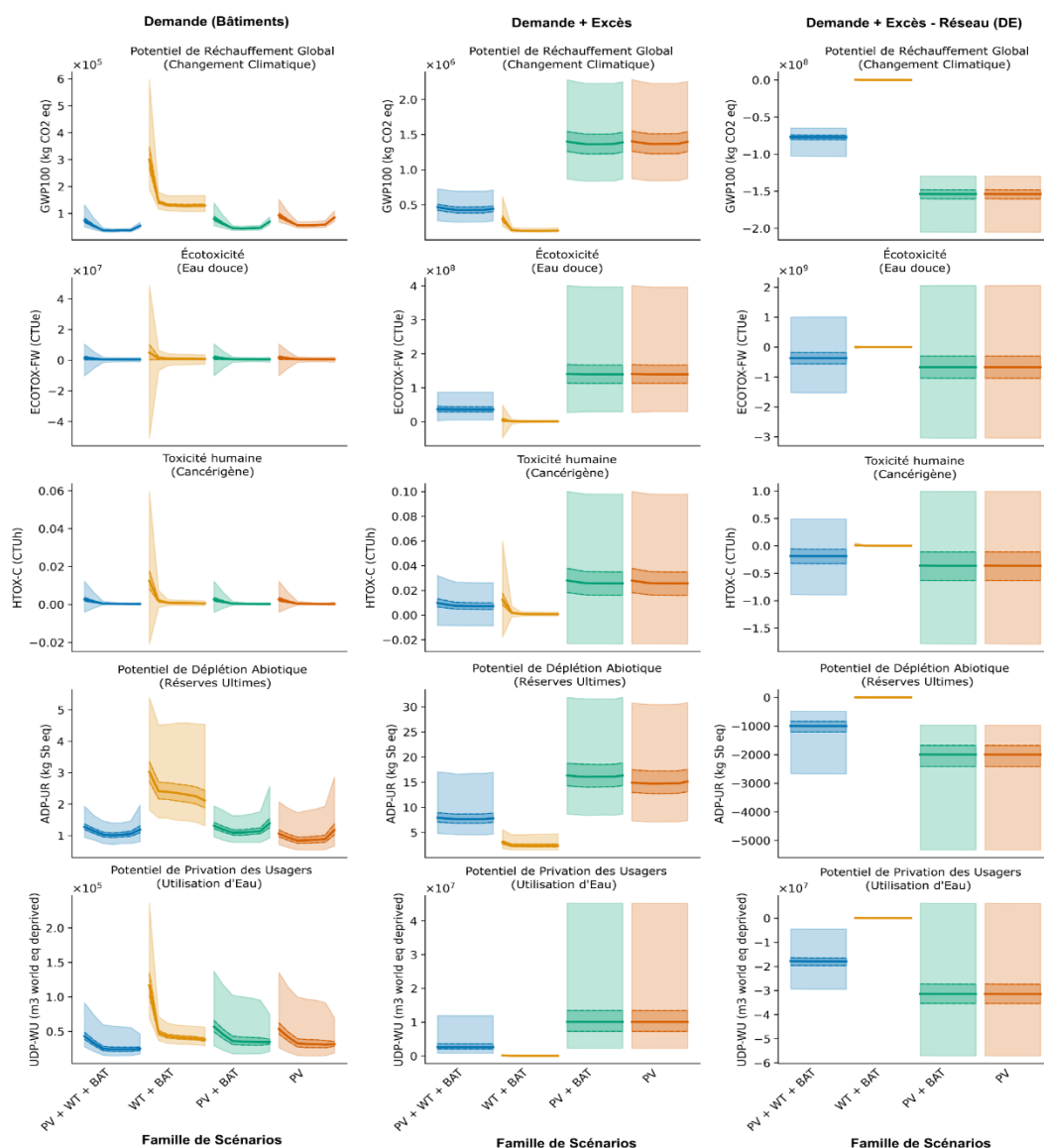


Figure VII-4: Impacts environnementaux avec incertitudes du système énergétique basé sur l'hydrogène, par famille de scénarios. Dans chaque famille, la progression se fait par capacité de stockage de H₂ décroissante. Les lignes représentent la catégorie environnementale testée. Les colonnes représentent la frontière de prise en compte des impacts. Le tracé en ligne pleine représente la valeur médiane des simulations Monte Carlo. Le tracé en pointillé délimite les quartiles $\pm 25\%$ autour de la médiane.

Dans la frontière d'évaluation « Load », seuls les flux répondant à la demande en chaleur et électricité des bâtiments d'Offenburg sont comptabilisés. Les incertitudes empêchent de conclure sur un impact toxicité ou écotoxicité (eau douce), quel que soit le scénario. Pour les

autres indicateurs, les scénarios WT + BAT montrent un impact plus élevé sur le changement climatique. Le minimum d'impacts se situe pour des capacités de stockage H2 entre 10 et 100 m³, sans différence notable à l'intérieur de cette plage. Comme ces valeurs sont réalistes, on en déduit que la capacité de stockage H2 a peu d'impact sur le bilan, les familles de scénarios étant plus déterminantes. Dans le cas « Load + Excess », on ajoute la surproduction d'électricité non utilisée pour les bâtiments. Ici, le classement s'inverse : les scénarios WT + BAT ont les impacts environnementaux les plus faibles, toutes catégories confondues.

La figure 5 représentant l'analyse par contributions aux impacts permet d'expliquer ce phénomène. En effet, ces scénarios WT + BAT sont ceux où la surproduction d'électricité est la moins importante, représentant au maximum 20-25 % de l'impact. Les autres familles de scénarios, définies par la présence de l'infrastructure photovoltaïque, produisent de très importantes quantités d'électricité inutiles à la demande directe des bâtiments, qui peuvent représenter jusqu'à 99 % de l'impact sous cette perspective.

Cette surproduction d'électricité est considérée comme injectée dans le réseau. On peut supposer qu'elle remplace une production issue du mix électrique allemand, ce qui permet de calculer les impacts évités en soustrayant du bilan « Load + Excess » les impacts liés à cette quantité d'électricité si produite par le mix national. Le cas « Load + Excess - Grid (DE) » inverse alors à nouveau le classement des scénarios : l'impact environnemental actuel du mix allemand fait que les scénarios incluant du PV et donc une forte surproduction conduisent *in fine* à beaucoup d'impacts évités. La figure VII-5 s montre finalement un rapport impacts système / impacts évités allant de 120 à 200 pour le changement climatique, de 4 à 10 pour l'écotoxicité eau douce, de 14 à 23 pour la toxicité humaine cancérigène, de 130 à 160 pour les ressources minérales, et de 3 à 7 pour l'usage de l'eau.

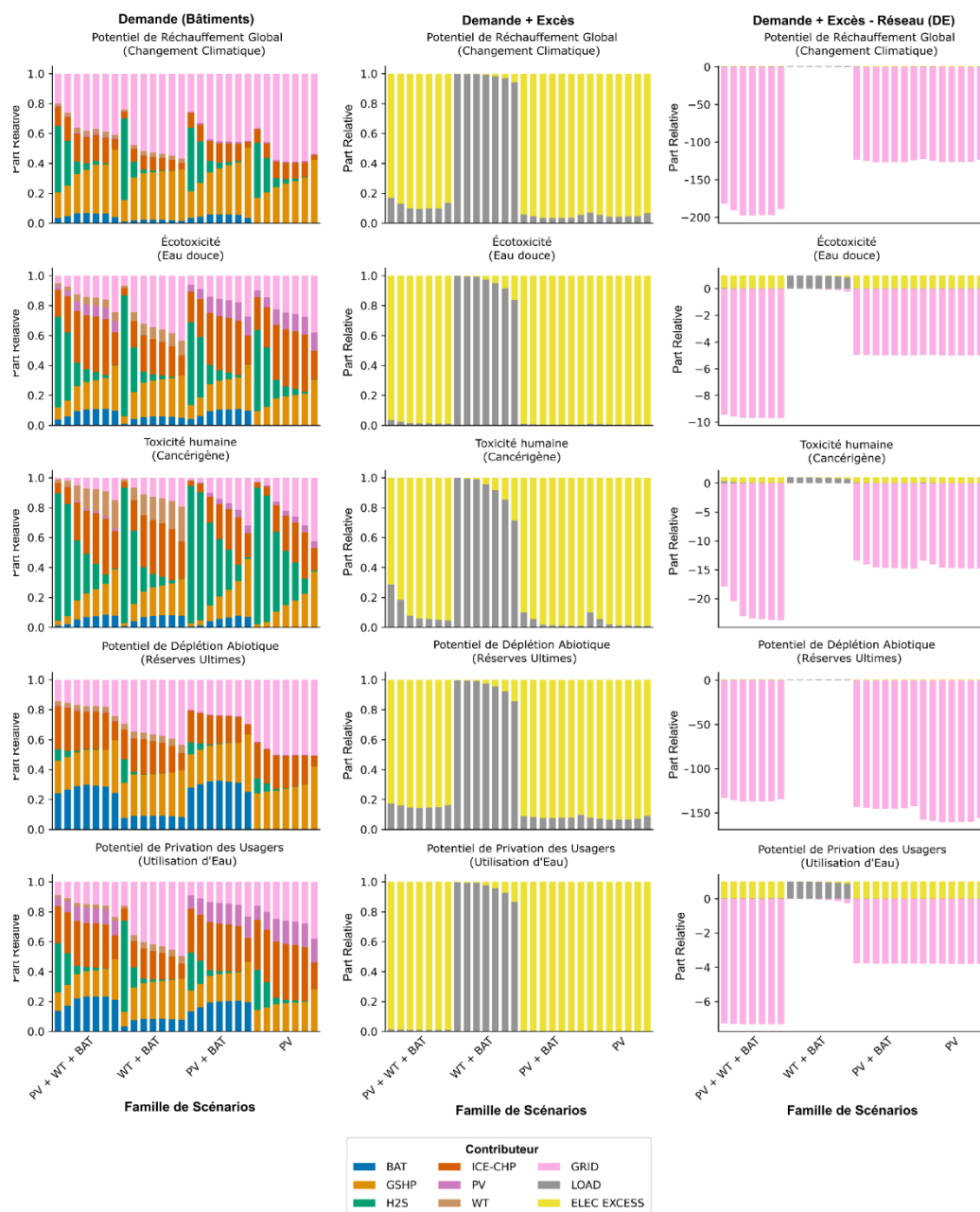


Figure VII-5 : Contributions des sous-systèmes à l'impact du système énergétique basé sur l'hydrogène, par famille de scénarios.

Dans chaque famille, la progression se fait par capacité de stockage de H(2) décroissante. Les lignes représentent la catégorie environnementale testée. Les colonnes représentent la frontière de prise en compte des impacts. Dans la colonne « Load + Excess - Grid (DE) », les impacts évités (valeurs négatives) de GRID sont normalisés par rapport à la somme « Load + Excess ». PV : photovoltaïque, WT : éolien, BAT : batterie, ICE-CHP : moteur à combustion interne pour cogénération d'électricité et de chaleur, GSHP : pompe à chaleur géothermique, PEMEL : électrolyseur à membrane échangeuse de protons, H2C/S : compression et stockage de H(2), LOAD : demande des bâtiments, GRID : réseau électrique.

Ces résultats doivent toutefois être interprétés avec prudence :

- Les impacts évités sont tributaires du fort impact actuel du mix électrique allemand. Dans le cadre de la trajectoire de décarbonation, celui-ci est censé

diminuer au cours du temps, réduisant du même coup l'importance des impacts évités.

- Une importante surproduction électrique peut poser des soucis de stabilité du réseau électrique si elle ne rencontre pas de demande à sa hauteur au moment du transfert. L'analyse présentée ici représentant une intégration annuelle, elle implique le postulat d'une possibilité effective du transfert tout au long de l'année, sans la garantir.

VII.3.2.2. Approche par le métabolisme territorial

L'approche par le métabolisme territorial permet de mettre en lumière plusieurs points de vigilance du projet CHP. Faute de données précises, ces analyses restent exploratoires et ne permettent pas de conclusions définitives.

VII.3.2.2.1. Enjeux du stockage dans les réseaux énergétiques

L'étude EUCOR, URCforSR (2022) souligne l'importance de coupler la production d'hydrogène à une électricité bas carbone. Bien que partiellement hors du périmètre du projet CHP, cette exigence reste déterminante. L'étude recommande de cibler en priorité les usages industriels, plus efficaces sur le plan écologique et économique, avant d'envisager les mobilités lourdes ou le stockage intersaisonnier. Ce dernier, bien que techniquement envisageable via l'hydrogène, reste coûteux et ne devient crucial que dans des réseaux fortement intermittents (Shirizadeh et al. 2022), ce qui ne correspond pas encore au contexte européen. D'autres options concurrentes existent (barrages, stockage thermique/chimique, méthanation) avec des maturités variables.

VII.3.2.2.2. Analyse économique

L'évaluation économique de l'hydrogène reste incertaine. Si certaines études sont optimistes (Vartiainen et al., 2021), d'autres (Gorbatko, 2023 ; Pécourt, 2024) soulignent ses limites. Le CAPEX élevé impose un fonctionnement intensif des installations (≈ 8000 h/an), incompatible avec un usage intermittent. Les données de marché nécessaires à l'évaluation de l'hydrogène comme outil de flexibilité sont encore trop rares. De plus, l'électrolyse reste 3 à 5 fois plus coûteuse que le vaporeformage. Dans ce contexte, la multiplication des petites unités paraît prématurée ; il vaudrait probablement mieux concentrer les efforts sur des démonstrateurs bien instrumentés, en clarifiant les niveaux de coûts (sortie électrolyseur, compression, livraison).

VII.3.2.2.3. Analyse logistique

Trois configurations sont possibles pour l'approvisionnement : production sur site, distribution par réseau ou livraison routière. La production sur site maximise l'autonomie mais limite la mutualisation. À l'inverse, la production centralisée permet des économies d'échelle, notamment au-delà d'une certaine taille critique (Vartiainen et al., 2021). Le choix logistique doit, s'appuyer sur une analyse techno-économique intégrant les usages, la localisation et les coûts marginaux, encore trop peu développée.

VII.3.2.2.4. Analyse spatiale

L'implantation du CHP Engine, d'une puissance unitaire de 1 MW, impose des contraintes de localisation importantes. Ce type d'équipement n'est pertinent que dans des environnements où la demande thermique et/ou électrique est suffisante et stable comme dans les zones industrielles ou certains grands ensembles tertiaires (centres administratifs, établissements d'enseignement supérieur, piscines). L'intégration à des réseaux de chaleur renforcerait la pertinence territoriale de la cogénération, en valorisant efficacement la chaleur cogénérée. Une analyse spatialisée croisant demande, accessibilité et potentiel d'interconnexion est donc essentielle.

VII.3.2.3. Conclusions

L'approche par le métabolisme territorial révèle les nombreux verrous de la filière hydrogène, notamment économiques et infrastructurels. Malgré ses promesses en matière de décarbonation, l'usage de l'hydrogène en cogénération décentralisée reste incertain. La priorité devrait être donnée à la R&D, via des démonstrateurs bien équipés et une meilleure diffusion des données technico-économiques. Le manque de transparence actuel nuit à la construction de stratégies territoriales robustes et peut conduire à des investissements inadaptés.

VII.3.2.4. Données et connaissance des flux énergie et mobilité dans le Rhin-Supérieur

Inventaire des jeux de données

L'inventaire des données a permis d'identifier 59 sources de données pour décrire les enjeux énergétiques et de mobilité dans le Rhin supérieur. Comme cela a déjà été mis en évidence lors de travaux précédents (Ribon et al, 2021), nous constatons également la forte hétérogénéité des données disponibles de part et d'autre des frontières. Cela rend particulièrement complexe le travail d'analyse transfrontalière. Finalement, parmi les sources inventoriées, seules les données sur les bornes de recharge de véhicules électriques sont réellement utilisables pour construire un jeu de données homogène couvrant l'ensemble du territoire Rhin-Supérieur. Ces travaux sont décrits plus en détails dans le lot de travail n°3.

Sur un autre registre, aux côtés des données institutionnelles, les données d'OpenStreetMap (OSM) se montrent particulièrement intéressantes. Cette base géographique libre, mondiale et collaborative, présente une qualité comparable à celle des sources institutionnelles. Dans le Rhin Supérieur, certaines bornes de recharges sont présentes dans OSM mais absentes des données officielles, et inversement. Les limites de fiabilité, reconnues par les producteurs de données publiques, renforcent l'intérêt d'OSM comme ressource complémentaire, transfrontalière et réutilisable pour l'analyse des systèmes territoriaux et énergétiques (Wided et al, 2017 ; Arderne et al. 2020 ; Xiong et al, 2024).

Plateforme Sinamet Web

En complément du travail d'inventaire, nous avons déployé une plateforme web de visualisation de données, basée sur la librairie logicielle open source *Sinamet*. La plateforme est accessible à l'adresse : <https://app.sinamet.tech/environ/co2inno/> et quelques captures d'écran sont présentées en annexe.

La plateforme valorise certains des jeux de données recensés dans l'inventaire à travers différentes visualisations paramétrables. Comme nous l'avons mentionné, l'hétérogénéité des données n'a pas permis de construire des visualisations couvrant l'ensemble du territoire du Rhin Supérieur. À la place, nous avons plutôt un patchwork qui couvre des morceaux du territoire selon les thématiques.

VII.3.3. Problèmes et risques

VII.3.3.1. Transversal

VII.3.3.1.1. Analyse du cycle de vie prospective

Les modèles IAM utilisés pour « futuriser » les bases LCA ne disposent pas d'une résolution nationale, pourtant cruciale car le mix électrique national influence fortement le cycle de vie étudié. L'outil premise permet d'intégrer des scénarios nationaux en LCA prospective, comme pour la Suisse (Hahn Menacho et al., 2025). RTE travaille sur une adaptation pour la France, mais celle-ci n'est pas encore publique, et aucune initiative similaire n'existe en Allemagne.

^{VII.3.4} Ainsi, pour comparer la France et l'Allemagne en LCA, nous sommes limités à une étude statique non prospective, avec les mix électriques nationaux disponibles.

Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.3.4.1. Construction de l'inventaire des flux pour l'analyse du cycle de vie

La principale difficulté du projet a été d'établir un inventaire fiable des flux matière et énergie lors du démantèlement. Le rapport initial d'EDF (2020) manquait de données chiffrées, obligeant à de larges approximations pour notre étude LCA pilote. La version mise à jour, accompagnée d'une étude d'impact accessible lors de l'enquête publique, apporte plus de détails, mais reste insuffisante. L'inventaire annualisé actuel pour les 15 ans de

démantèlement repose donc sur plusieurs hypothèses, ce qui ajoute de l'incertitude aux résultats de l'étude prospective à venir.

VII.3.4.2. Sur le plan juridique

En l'absence d'un cadre juridique explicite relatif à la réutilisation de l'existant dans un démantèlement, il a fallu analyser les principes directeurs de différents droits, et les indices relevant d'une multitude de normes techniques. Concernant le recyclage des déchets radioactifs TFA, il n'y a en droit français que peu de recul. La question des responsabilités des parties prenantes en cas de dommages causés par la radioactivité dans le cadre des réutilisations de matières fera l'objet d'une publication à venir.

VII.3.4.3. Observatoire des Impacts du Démantèlement

Le rôle d'interface et la mise en confiance requièrent une ingénierie pour animer les espaces de discussions qui peuvent émerger. Cela soulève l'enjeu de sécurisation de l'emploi au sein de l'Observatoire, difficile à garantir dans le contexte budgétaire de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Cela dit, les personnes interrogées ayant des mandats dans des organismes finançant la recherche ont montré un intérêt pour un observatoire dédié au démantèlement.

VII.3.4.4. Intégration entre Analyse du cycle de vie et Analyse technico-économique

Plusieurs obstacles freinent l'intégration des approches LCA et TEA en open source. D'une part, des difficultés techniques : *OpenModelica* peine à gérer les frameworks Python ou les fichiers Excel issus des résultats LCA, et l'optimisation du modèle non linéaire demande des calculs intensifs. D'autre part, des obstacles pratiques : la LCA compare souvent des fonctionnalités simples (ex. 1 kWh électrique, 1 MJ chaleur, 1 kg hydrogène) avec des infrastructures types, tandis que la TEA analyse un système précis localisé. Joindre LCA et TEA requiert donc un travail d'adaptation important entre les inventaires-types en LCA et les dimensionnements réels du système en TEA.

VII.3.4.5. Connaissance du métabolisme territorial

La principale difficulté dans l'étude du métabolisme territorial est de recueillir les données suffisamment fines décrivant les flux de matière et d'énergie mobilisés dans les territoires. Ces données sont produites par différents acteurs (collectivités, opérateurs privés, services de l'État), hétérogènes dans leur format, parfois confidentielles. Les données disponibles présentent généralement une faible granularité spatiale et temporelle et ne permettent pas d'atteindre le niveau de précision nécessaire pour analyser des installations spécifiques. Cette absence de granularité compromet non seulement la compréhension fine des interactions

territoriales, mais aussi la possibilité de simuler des scénarios de transformation ou de mesurer les effets systémiques des projets étudiés.

VII.4. Déviations

Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.4.1.1. Développement des recherches LCA selon les données effectivement obtenues

^{VII.4.1.} Le projet visait d'abord à étudier en détail les déchets VLLW/TFA issus du démantèlement et leur lien avec le Technocentre de transition industrielle de Fessenheim. Cependant, faute de données probantes en temps utile, l'étude LCA n'a pu être finalisée avant la fin du projet. De même, la quantification des impacts évités par la réutilisation des bâtiments du CNPE reste incomplète, en raison du temps nécessaire pour constituer un inventaire annualisé fiable des flux matière/énergie sur 15 ans, compliqué par des difficultés d'interaction avec EDF. Ces études seront toutefois terminées dans les mois suivant la fin du projet.

À l'inverse, l'analyse des impacts radiologiques et leur modélisation en LCA et HERA, non prévue initialement, a pu être menée grâce à l'obtention de données pertinentes, mêlant cas d'étude et avancées méthodologiques.

VII.4.1.2. Observatoire des Impacts du Démantèlement

La difficulté d'accès aux données pour les études LCA, de même que le manque de littérature technique sur le cadre juridique du démantèlement, ont motivé en cours de projet les réflexions sur la pertinence de la création d'un observatoire académique du démantèlement. Une telle structure renforcerait la complémentarité – primordiale – entre les acteurs (universitaires, industriels, réglementaires, collectivités...) pour caractériser dans le temps long les transformations socio-écosystémiques liées au démantèlement et guider les stratégies de transition des sites nucléaires. Ce volet constitue un supplément au projet initial, sans impact sur ses objectifs initiaux. Il doit être vu comme une méta-analyse du travail mené dans ^{VII.4.2.} CO2Inno, permettant à la fois de valoriser les connaissances produites durant ce projet et d'assurer sa continuité.

Solution énergétique basée sur H₂

VII.4.2.1. Réduction du périmètre de l'analyse du cycle de vie

Cette partie de notre travail complète le projet initial du lot n°7, centré sur le démantèlement du CNPE de Fessenheim. Notre objectif, issu des échanges avec les autres groupes CO2Inno (notamment le lot n°2), était de réaliser une étude LCA prospective paramétrique, dont les résultats pourraient alimenter le modèle *OpenModelica* pour optimiser plusieurs paramètres environnementaux et technico-économiques. Finalement, nous avons privilégié l'approche

inverse : calculer les impacts environnementaux par LCA en Python à partir de simulations de flux issues du modèle TEA dans *OpenModelica*. Ce supplément n'a pas affecté les objectifs globaux du projet, mais a enrichi de façon pertinente ceux du lot n°2.

VII.5. Perspectives

Démantèlement du CNPE de Fessenheim

VII.5.1.1. Analyse du cycle de vie

La conclusion de l'étude LCA prospective, qui dépasse la fin officielle du projet, devrait fournir une première quantification des impacts évitables grâce à la réutilisation des bâtiments CNPE s pour le Technocentre. Ces résultats pourraient être suivis annuellement durant le démantèlement, si les échanges avec EDF se renforcent via l'OHM Fessenheim. Un aspect non intégré ici est la phase pré-démantèlement (2020-2025), incluant l'évacuation du combustible usé et les aménagements, dont la prise en compte éviterait un angle mort dans l'analyse environnementale de la fin de vie du CNPE.

VII.5.1.2. Observatoire des Impacts du Démantèlement

L'objectif est le développement de l'Observatoire des Impacts du Démantèlement au sein de l'OHM-Fessenheim, en développant notamment une structure interne d'acquisition et de gestion des données et en affirmant son rôle d'interface entre les différents acteurs.

VII.5.2.

Solution énergétique basée sur H₂

VII.5.2.1. Analyse du cycle de vie

Face aux limites évoquées, il semble pertinent d'envisager une optimisation environnementale

- Directement via l'approche LCA avec la librairie PULPO récemment publiée (Lechtenberg et al., 2024), approche linéaire réduisant les besoins en calcul tout en gardant la qualité, sous condition de contraintes basées sur l'étude de faisabilité.
- En comparant après coup un ensemble plus large de scénarios issus du modèle TEA dans *OpenModelica*, ce qui nécessite une automatisation complète de la conversion des sorties du modèle TEA en flux alloués aux différents niveaux d'arborescence du modèle LCA.

Par ailleurs, l'analyse du cycle de vie dépend aussi des conditions de production et transport de l'hydrogène, justifiant des analyses spatiales approfondies pour optimiser dimensionnement et localisation des sites.

Recommandations concernant la feuille de route ou l'action politique :
Démantèlement de la centrale nucléaire de Fessenheim

VII.5.4.1. Analyse du cycle de vie

Nos résultats montrent que les études LCA complètent les études d'impact réglementaires du secteur nucléaire. Cependant, l'accès aux données reste difficile, dépendant souvent de la volonté des opérateurs, qui communiquent de manière sélective selon le contexte (enquête, débat public). Deux options politiques sont possibles : imposer réglementairement les études LCA, ce qui garantirait leur réalisation mais pas nécessairement leur transparence ; ou renforcer les échanges entre chercheurs universitaires et industriels, soutenus par des institutions pour assurer leur indépendance. L'OHM Fessenheim semble être un outil pertinent pour favoriser cette seconde approche.

VII.5.4.2. Sur le plan juridique

Il conviendrait de bâtir un cadre juridique explicite et adapté aux différentes hypothèses de réutilisation d'un site nucléaire, permettant aux autorités compétentes d'imposer certains projets de réutilisation, et de ne pas dépendre uniquement du choix des exploitants.

VII.5.5. Solution énergétique basée sur H₂

VII.5.5.1. Diffuser la connaissance des systèmes énergétiques

La transition énergétique repose sur la capacité collective à comprendre, piloter et transformer les systèmes énergétiques complexes. Cette capacité dépend surtout de la disponibilité, la qualité et la circulation des données territoriales décrivant ces systèmes. Pour la renforcer, plusieurs leviers d'action politique sont identifiés.

Impulser l'ouverture des données technico-économiques liées à l'hydrogène et aux systèmes énergétiques

Le développement de filières émergentes comme l'hydrogène nécessite un pilotage stratégique coordonné entre acteurs publics et privés. Pourtant, les données technico-économiques (coûts, rendements, amortissements, facteurs de charge) restent souvent inaccessibles. Bien que la protection des intérêts industriels soit invoquée, le soutien public devrait reposer sur une transparence sur les données clés.

Reconnaître la dimension politique de la donnée

La donnée ne doit pas être vue comme une simple ressource technique, mais comme un objet de politique publique essentiel à la connaissance territoriale, avec des modes de production et diffusion qui structurent la société (Desrosières, 2008). Reconnaître cette dimension stratégique peut se traduire par la création d'instances territoriales dédiées, un encadrement juridique des données d'intérêt général, l'insertion de clauses « données » dans les marchés

publics, l'acculturation des agents publics, ou des dispositifs favorisant l'appropriation citoyenne de l'information.

Soutenir les communs numériques pour la connaissance des systèmes énergétiques

La cartographie ouverte et collaborative des infrastructures joue un rôle central dans la représentation des systèmes énergétiques et la diffusion de cette connaissance auprès des chercheurs, entreprises, citoyens ou institutions. Le projet OpenStreetMap, en tant que bien commun numérique mondial, offre un potentiel inédit pour cartographier les réseaux énergétiques, notamment dans les contextes où les données officielles sont absentes, fragmentaires ou inaccessibles. Le soutien à ces initiatives – via des financements, des apports de données ou l'ur leur intégration dans les formations – renforcerait les recherches en faveur de la transition écologique.

S'appuyer sur des observatoires territoriaux

Les analyses de métabolisme territorial et les diagnostics énergétiques mobilisent un volume croissant de données complexes, nécessitant des compétences spécialisées. Leur complexité impose la création de dispositifs durables pour structurer, centraliser et rendre ces informations accessibles. Les observatoires territoriaux sont des outils clés pour assurer la continuité des connaissances, mutualiser la collecte et l'analyse, et soutenir la montée en compétence des acteurs locaux dans l'élaboration de trajectoires énergétiques.

VII.5.6. Réalisation des objectifs

VII.5.6.1. Type d'action 2

Action 6 : Utilisation d'un système d'information pour l'analyse des flux (SINAMET), pour les comparaisons et la contextualisation territoriale

Livrable : Plateforme web interactive ; Rapport d'analyse du territoire en utilisant le cadre du métabolisme territorial.

Réalisation : Création d'un inventaire des jeux de données pouvant alimenter la plateforme web ; Déploiement de la plateforme web Sinamet début 2024 (<https://app.sinamet.tech/envIRON/co2inno/>) et constitution d'une série de visualisations sur la plateforme ; Co-production du jeu de données sur les bornes de recharge dans le Rhin-Supérieur ; Rapport d'analyse des enjeux Flux et Territoires pour le projet CHP.

VII.5.6.2. Type d'action 4

Action 5 : Cadre juridique d'une stratégie de reconversion du site nucléaire de Fessenheim

Livrable : rapport sur le cadre juridique pour une stratégie de reconversion du site nucléaire de Fessenheim

Réalisation : Rapport final rendu en septembre à l'issue à l'issue des travaux encore en cours.

VII.5.6.3. Type d'action 7

Action 1 : Caractérisation des matériaux et infrastructures du site nucléaire de Fessenheim

Livrable : rapport concernant la détermination du système et des données de flux d'inventaire (liste des matériaux et infrastructures en fonction du niveau de contamination résiduelle) .

Réalisation : 2 inventaires de cycle de vie (LCI) réalisés dans le cadre de publications scientifiques.

1. Un premier fournissant une estimation enveloppe, à partir du rapport de démantèlement initialement disponible (EDF, 2020) dans le cadre de l'étude LCA pilote (Iguyer et al., 2024)
2. Un second, actualisé et ajoutant la prise en compte des émissions de radionucléides, les rejets de substances chimiques et la consommation d'eau, à partir de la version mise à jour du rapport de démantèlement (EDF, 2024a) et de l'étude d'impact réglementaire l'accompagnant (EDF, 2024b), dans le cadre de l'étude LCA prospective en fin de réalisation (finalisation pour la fin du projet CO2InnO, donnera lieu à une publication scientifique supplémentaire)

Action 2 : Analyse du cycle de vie du démantèlement

Livrable : 1 publication.

Réalisation : Plusieurs publications et communications scientifiques (voir la liste exhaustive en annexe). On mentionne tout particulièrement 2 articles dans des revues internationales à comité de lecture déjà publiés : étude pilote LCA sur le démantèlement complet, et étude LCA prospective focalisée sur les impacts radiologiques. Un 3e article, en cours de rédaction, portera sur l'extension de la démarche de LCA prospective à l'ensemble du démantèlement.

Action 3 : Étude environnementale de différents scénarios de transition industrielle du site de Fessenheim

Livrable : rapport sur les scénarios de transition industrielle du site de Fessenheim avec évaluation de l'impact environnemental en fonction du taux de recyclage / réutilisation pour le développement de nouvelles solutions énergétiques, 1 publication

Réalisation : Note synthétique sur l'état des lieux des dynamiques en cours concernant l'évolution du site de Fessenheim.

VII.6.1.

VII.6. Objectifs additionnels

Analyse du cycle de vie du système CHP

Réalisation :

Un ensemble de scripts en Python pour :

- Die Ergebnisse des *OpenModelica-Modells*, das vom Arbeitsgruppe 2 (Reinigung) entwickelt wurde, überarbeiten
- Reconstruire les flux d'électricité, chaleur et hydrogène entre sous-systèmes de la solution énergétique modélisée
- Visualiser les résultats sous la forme de diagrammes de flux interactifs, utilisables par le public

Plusieurs publications et communications scientifiques (voir la liste exhaustive en annexe). On mentionne tout particulièrement 1 article dans une revue internationale à comité de lecture, en cours de finalisation.

Observatoire académique du démantèlement

Réalisation : rédaction d'un livre blanc mettant en avant les enjeux et les caractéristiques d'un observatoire pour favoriser la mise en place de travaux de recherche académiques sur le démantèlement