

Rapport de stage

**MASTER sciences et technologie
Mention Génie Industriel (GI)
Parcours Conception et Ergonomie**

**“ Analyse du cycle de vie (ACV) prospective du
démantèlement du CNPE de Fessenheim”**

Par

Mehdi Iguyer

Maître de stage : Mme Gaetana QUARANTA (MCF)

Tuteur de stage : M. Michal KOZDERKA (MCF)

Année Universitaire 2021 / 2022

CLAUSE DE CONFIDENTIALITE

L'organisme d'accueil sera amené à communiquer au stagiaire/apprenti des informations strictement confidentielles, propriété de l'entreprise, afin de permettre à l'étudiant(e) d'effectuer le travail demandé lors du stage/apprentissage et aux membres du jury d'évaluer ce travail.

Le rapport de stage/d'apprentissage doit contenir le strict minimum permettant d'évaluer le travail fourni par le stagiaire/l'apprenti. Les pièces complémentaires jugées utiles et confidentielles peuvent être amenées au moment de la soutenance puis restituées à l'organisme d'accueil après la soutenance.

Il existe 3 niveaux de restriction applicables aux informations communiquées ainsi qu'à leur transcription dans le rapport de stage/d'apprentissage :

Absence de confidentialité	Confidentialité partielle	Confidentialité totale
Rapport déposé à la bibliothèque	Rapport confidentiel	Rapport confidentiel
Soutenance publique	Soutenance publique	Soutenance à huis-clos
Rapport consultable et utilisable par les étudiants et les enseignants	Rapport conservé pendant un an puis détruit par la Faculté	Rapport restitué au représentant de l'organisme d'accueil après la soutenance
	Mention « confidentiel » sur la page de garde du rapport	Mention « confidentiel » ET « huis-clos » sur la page de garde du rapport

Les articles 10 et 11 de la convention de stage signée par le stagiaire, la Faculté et l'organisme d'accueil stipulent en outre les règles relatives au devoir de réserve, à la confidentialité et à la propriété intellectuelle

Je soussigné(e) Madame, Monsieur QUARANTA Gartana
 Fonction : MCF - Encadrante du stage -
 Organisme d'accueil : IPHC
 Stagiaire/apprenti : Mehdi Tajider

Souhaite (cochez la case correspondante) :

- Absence de confidentialité
 Confidentialité partielle
 Confidentialité totale

Fait à : Strasbourg le : 21.06.2022

Signature :



Remerciement

Je souhaite tout d'abord remercier ma tutrice, Madame Gaetana Quaranta, pour m'avoir formé, suivi, écouté et conseillé durant ce semestre de stage. Mais aussi pour sa confiance et le partage de ces expériences.

Ensuite, je voudrais remercier Monsieur Kozderka pour ses conseils et son aide tout au long de ce stage, ainsi que Monsieur Rose et le corps enseignants qui nous ont permis d'apprendre et d'évoluer tout au long de ces 2 ans de master

Je souhaite également remercier l'IPHC pour leur accueil tout au long de ce stage. Je les remercie pour l'opportunité qu'ils m'ont donnée pour découvrir le domaine de la recherche, notamment dans la radiochimie.

J'aimerais remercier mes collègues de travail, pour leur soutien, leur aide, leur patience et leur bonne humeur, tout au long de ce stage.

Enfin, je remercie également L'OHM de Fessenheim et LABEX DRIIHM pour le financement de mon stage de M2 Génie Industriel.

Table des matières

Étude Bibliographique	9
I. Justificatif des choix de références	9
I. Champ de l'étude	10
1. Unité fonctionnelle (UF)	10
2. Construction et Opération.....	11
3. Démantèlement	11
II. Étude de la catégorie d'impact :	14
1. Réchauffement global.....	14
2. Écotoxicité aquatique	14
III. Proposition/Problématique	18
Expression du besoin d'études sur le démantèlement des CNPE	19
1. Présentation Générale.....	19
2. Processus de démantèlement	21
3. Gestion des déchets issus du démantèlement.....	21
Définition des objectifs et champs de l'étude	22
I. Méthodologie d'approche	22
1. ACV : Cadre conceptuel	22
2. Définition des objectifs et champ de l'étude	23
II. Analyse de l'inventaire.....	24
1. Démantèlement	27
2. Assainissement.....	27
3. Démolition.....	28
4. Transport de déchets.....	28
Etude d'impact.....	30
I. Calcul et modélisation	30
II. Sélection et choix des catégories d'impacts :.....	30
III. Évaluation des impacts.....	31
1. Démantèlement	31
2. Assainissement.....	34
3. Démolition.....	37
4. Transport :	39
4. Comparaison avec les autres études :	40
Conclusion	41
Apport du stage	43
Organisation du Stage.....	44

Glossaire

GES : Gaz à effet de serre

CNPE : centre nucléaire de production d'énergie

ACV : Analyse de cycle de vie

UF : Unité fonctionnelle

SADT : Structured Analysis and Design Technic, Analyse fonctionnelle descendante

ISO : International Standard Organisation - Organisation internationale de normalisation

Liste des figures

Figure 1 : Les différents laboratoires de l'IN2P3	6
Figure 2 : situation géographique de l'IPHC au sein du campus de Cronenbourg	7
Figure 3 : Organigramme de l'IPHC	7
Figure 4 : exemple de SADT de (Cluzel et al. 2013).....	10
Figure 5 : Système général des centrales électriques inspirées de (Sersova et al. 2020	11
Figure 6 : Sous système de (Warner et Heath 2012).....	13
Figure 7 Classification des déchets (CEA 2018).....	13
Figure 8 Variation de l'Émission CO ₂ eq/kWh lors du démantèlement	16
Figure 9 Analyse des ratios des catégories d'impact pour la C : Construction ; O : Operation ; T : Transport ; D : Démantèlement pour la CNPE GDF (Paulilo et al. 2020)	17
Figure 10: Localisation de la CNPE	19
Figure 11 : Composition des bâtiments au CNPE de Fessenheim (EDF 2020)	20
Figure 12 : Organisation de la fin de vie du CNPE de Fessenheim (EDF 2020)	21
Figure 13 : Les principales étapes de l'Analyse du Cycle de Vie et leur cadre méthodologique (Univ. Valenciennes, 2012).....	22
Figure 14 : Analyse fonctionnelle descendante d'un démantèlement d'un CNPE	23
Figure 15 : Limite du système de l'ACV	24
Tableau 1 : Liste des données issues de la littérature afin de développer l'inventaire	25
Tableau 2: Inventaire de Cycle de Vie	26
Formule 1: Gaz parfait.....	27
Figure 16 :Simulation préliminaire afin de sélectionner les catégories d'impact.....	30
Figure 17 : Comparaison des impacts des traitements de démantèlement.....	31
Figure 18: Camembert représentant les émissions de réchauffement global lors du démantèlement .	32
Figure 19 Comparaison des impacts du process d'assainissement	34
Figure 20 : Camembert représentant les impacts d'utilisation de ressources renouvelable lors de l'assainissement	35
Figure 21 : Camembert représentant les impacts sur l'écotoxicité terrestre de l'assainissement	36
Figure 22 : Comparaison des impacts du processus de démolition.....	37
Figure 23 : Camembert représentant les impacts des Effets respiratoires (inorganiques) lors de la démolition	38
Figure 24 : Comparaison de Transport de déchets.....	39
Figure 25 : diagramme de GANTT pour l'organisation du stage.....	44
Tableau 3 : Catégories d'impact de la méthode « IMPACT 2002+ »	48
Tableau 3 : Les cotes des bâtiments.....	49

A. Présentation de l'organisme d'accueil

Fondé par loi-décret le 19 octobre 1939, le CNRS est constitué de 3 instituts nationaux et de 1 100 unités de recherche, avec 34 000 chercheurs, ingénieurs et techniciens. Au sein de ces 3 instituts se trouve l'IN2P3, l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des particules.

Les missions de l'IN2P3 sont de coordonner des programmes pour le CNRS, d'explorer les infinis (des particules au cosmos) et d'apporter compétences et expertises ¹. Avec 40 Milliards de budget annuel, l'IN2P3 possède 25 laboratoires et plateformes avec 2 500 chercheurs, techniciens et ingénieurs du CNRS, travaillant sur 40 grands projets internationaux.

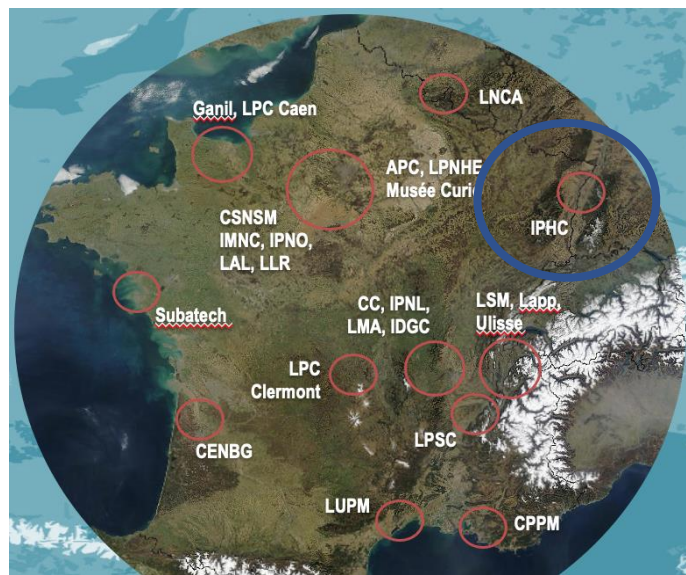


Figure 1 : Les différents laboratoires de l'IN2P3

Au sein de l'IN2P3, plusieurs thématiques scientifiques sont abordées, telles que la physique des particules, la physique nucléaire et hadronique ainsi que l'astroparticules et les neutrinos.

Des collaborations avec des laboratoires à l'international ont été créés, par exemple avec LHC, Isolde/Cerne en Suisse, LSST au Chili ou encore T2K/Jparc, Riken au Japon.

Les multiples thématiques présentes à l'IN2P3 permettent des partenariats industriels au niveau de l'imagerie médicale, le spatial, l'environnement et l'électronique.

¹ Diaporama Présentation IN2P3

Parmi ces 25 laboratoires, j'ai réalisé mon stage à l'IPHC, au sein du campus de Cronenbourg. Cette unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Strasbourg a été créée le 1^{er} janvier 2006 ².

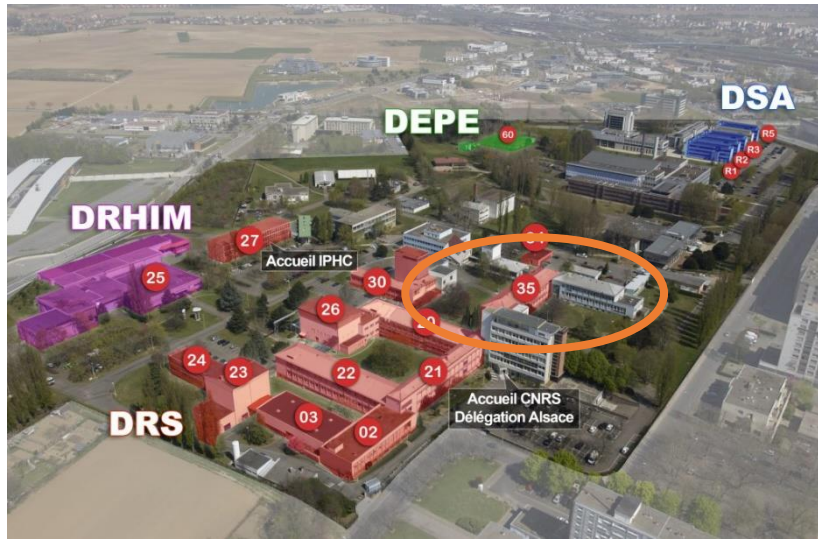


Figure 2 : situation géographique de l'IPHC au sein du campus de Cronenbourg

Le laboratoire regroupe 400 agents répartis dans 22 équipes, dans 4 domaines de recherche : (DEPE : Département Écologie, Physiologie et Éthologie ; DRS : Département de Recherche Subatomique ; DSA : Département de Recherche Analytique ; DRHIM : Département de Radiologie, Hadronthérapie, et d'Imagerie Moléculaire).

Ainsi, le service qui m'a accueilli est le service de Radiochimie (Bâtiment 35), au sein de l'équipe scientifique de l'Énergie, environnement et dosimétrie, dans le Département de Recherches Subatomiques.

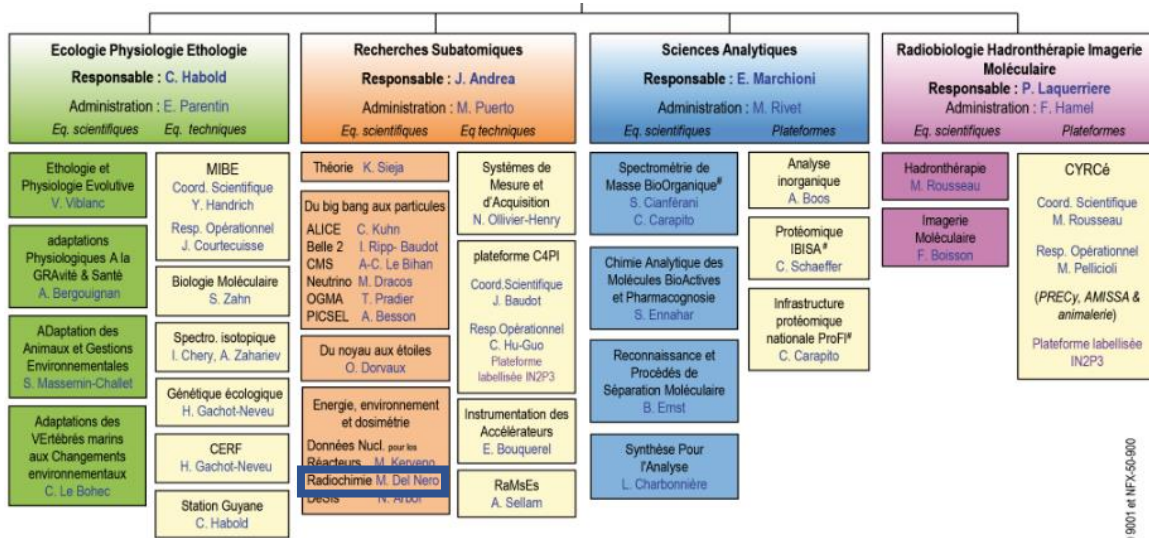


Figure 3 : Organigramme de l'IPHC

² Wikipedia contributors. (2022, 13 janvier). Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien. Wikipédia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Institut_pluridisciplinaire_Hubert-Curien

B. Avant-propos

En 2007, l'Union européenne a pris l'initiative de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80% jusqu'à 2050. Selon l'UE, la production d'énergie issue du nucléaire permet une contribution importante à la transition énergétique. (UE, 2007)

Il est aussi reconnu que l'usage d'énergie renouvelable tel que le nucléaire diminue l'impact sur la santé humaine comparée à l'énergie fossile (UE, 2007). De plus, l'impact sur l'environnement tel que le réchauffement climatique est inférieur à celle des énergies fossiles (Gibon *et al.* 2017). En effet, la France est un des leaders mondiaux en production d'énergie nucléaire avec 353 833GWh d'énergie produite en 2020 (IEA, 2020). Or EDF annonce que le démantèlement de 14 réacteurs nucléaires est prévu d'ici 2035 (dont Fessenheim). Avec la demande de démantèlement en hausse, « L'expertise acquise par les entreprises françaises [...] des opérations de démantèlement menées sur les CNPE depuis plus de 30 ans permet de répondre efficacement aux défis que présentent ces grands chantiers internationaux. » (ANDRA). En effet, le retour d'expérience est important pour comprendre les difficultés liées aux démantèlements et en tirer des enseignements. Le projet de « l'Analyse du cycle de vie (ACV) prospective du démantèlement du CNPE de Fessenheim » a pour but d'évaluer et d'effectuer une modélisation des impacts environnementaux lors de la phase de fin de vie du CNPE de Fessenheim. Cette modélisation a pour but d'aider à la décision politique en matière de gestion de déchets radioactifs et de gestion environnementale territoriale.

C. Cadre de l'étude

Étude Bibliographique

I. Justificatif des choix de références

La recherche bibliographique a été effectuée en utilisant les moteurs de recherches Science direct et Google Scholar. L'association des mots clés étant : nuclear, powerplant, Life Cycle Assessment (LCA), decommission, decontamination, Functional unit, nuclear waste.

54 documents sur 73 ont été gardés pour cette recherche bibliographique, puisqu'ils traitent de l'ACV d'un démantèlement de CNPE. Cependant d'autres études ont choisi l'EIA permettant de sélectionner les meilleures options quant aux procédés de démantèlement (Bond *et al.*).

Plusieurs documents traitant sur le cycle de vie entier d'un CNPE, depuis sa construction jusqu'à son démantèlement, ont été trouvés. Cependant, peu de documents existent (2 à notre connaissance) concernant l'ACV appliquée uniquement au démantèlement. (Seier *et al.*, 2014 et Wallbrige *et al.*, 2012)

Durant cette recherche bibliographique, nous avons pu constater que le champ³ de l'étude diffère selon les articles. En effet, le choix de ces points-là est à la discrétion des auteurs selon leurs besoins. A titre d'exemple, Wallbridge *et al.*. 2012, se sont concentrés sur la phase de démantèlement d'un CNPE sans considérer la construction et l'opération. Cependant, la décision d'inclure les 2 phases avait été prise dans le cadre des autres études de CNPE. (Paulillo *et al.* 2020)

Nous pouvons noter la présence d'articles utilisant des méthodes statistiques avec les valeurs d'émission GES de plusieurs centrales nucléaires tel que (Kadiyala *et al.* 2016) qui classifie les valeurs selon le type de centrale nucléaire. Ou encore (Sovacool 2008), qui classifie selon les étapes d'une vie d'une CNPE. Il faut développer ces articles.

Les valeurs de l'émission de CO₂ dans les études sont très variables selon les différentes études. (Sovacool, 2008), ils varient de 0.1 à 45 g CO₂/ kWh (Figure 8).

³ En ACV le champ de l'étude définit la limite du système étudié, la fonction du système ainsi que ses processus élémentaires et l'unité définissant ce système appelé unité fonctionnelle.

I. Champ de l'étude

1. Unité fonctionnelle (UF)

Une des questions qui se pose est le choix de l'unité fonctionnelle. Selon l'ISO 14040, l'unité fonctionnelle est « une performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie ». Il a été constaté que « l'ACV est une approche relative, structurée autour d'une unité fonctionnelle. Cette unité fonctionnelle définit l'objet de l'étude. Toutes les analyses ultérieures dépendent donc de cette unité fonctionnelle parce que tous les intrants et extrants de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) [...] sont en rapport avec l'unité fonctionnelle. » (AFNOR ISO 14040, 2006)

Tout d'abord, afin d'avoir une idée sur l'unité fonctionnelle de cette étude, un outil d'analyse fonctionnelle descendante a été utilisé (Cluzel *et al.* 2013). Cet outil appelé SADT (Structured Analysis and Design Technic) est traditionnellement utilisé pour la conception de produit. Il permet d'illustrer le processus du produit et avoir des idées d'UF (cf. Fig.4)

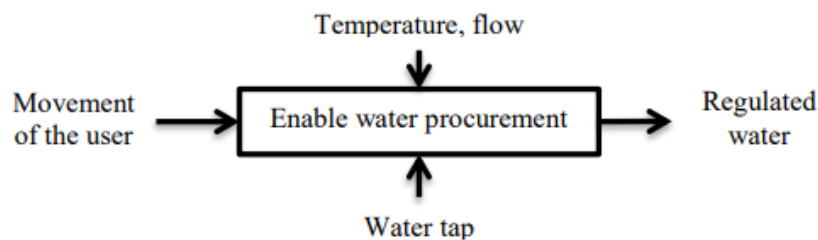


Figure 4 : exemple de SADT de (Cluzel *et al.* 2013)

Afin de déterminer l'UF qui va être utilisée, 4 questions qui sont nommées les « paramètres de l'UF » doivent être posées : Quoi ? Combien ? Comment ? Combien de temps ? » (Joint Research Center - Institute for Environment and Sustainability, 2010) (Cluzel *et al.* 2013). Pour Cooper, 2003, l'UF doit être clairement définie et mesurable. L'expression de l'UF doit être évaluée selon 3 points :

- L'Amplitude du service : Les caractéristiques de l'action (Quoi ? Combien ?)
- La durée du service : La limite temporelle de l'étude doit être prise en compte (Combien de temps ?)
- Le niveau de qualité attendue : La prise en compte des paramètres qui influent sur la capacité du système à fournir l'ampleur du service (Comment ?)

Néanmoins, il a été constaté que le fait de baser l'unité fonctionnelle sur la durée du service peut poser un problème. En effet, l'innovation constante des méthodes et technologies peut influencer sur l'inventaire.

Les différentes références présentent par défaut comme unité fonctionnelle : le Wh. Pourtant, il a été constaté dans les 2 publications traitant uniquement du démantèlement que l'unité fonctionnelle utilisée est « démantèlement d'une centrale nucléaire » (Seier *et al.*, 2014, Wallbridge, 2012). Cependant, afin d'avoir la possibilité de comparer les résultats avec d'autres publications, les auteurs donnent une équivalence en Wh selon la quantité d'énergie produite par le CNPE.

2. Construction et Opération

Comme il a été dit dans la section [I.], le choix des sous-systèmes sur la construction et l'opération de CNPE varient selon les objectifs de l'étude :

La dimension et la liberté des choix de limite peuvent être constatées comme le choix de prendre en compte le déplacement des opérateurs dans leurs systèmes. (Carless *et al.* 2016). Ou encore, le choix de prendre comme système « la construction » et ne pas avoir de sous-système (Wang *et al.* 2018, 2019) ou regrouper le système « opération » sans aucun autre sous-système (Wallbridge *et al.* 2012) (Seier, 2014). Mais le choix de différencier la construction et la « manufacture » peut être fait par exemple avec le sous-système : Extraction/Process des matériaux ; Production des matériaux de construction (Wang *et al.* 2018).

3. Démantèlement

i. Limite du système

Le manque de données liées au démantèlement est apparent lors de la recherche bibliographique, notamment pour l'inventaire de cycle de vie (Paulillo 2018) (Fthenakis 2007). En effet, « le démantèlement est une étape où les données n'existent pas ». Par conséquent, des estimations basées sur l'énergie relative d'une autre étape de la vie du CNPE sont utilisées afin de calculer l'Énergie relative et les GES du démantèlement (Beerten *et al.* 2009). En effet, une méthode possible pour estimer la quantité d'Énergie nécessaire au démantèlement est d'extrapoler les données disponibles de la construction d'un CNPE. Cependant, les estimations varient considérablement de 30-35% à 50% (ISA, 2006, Voorspools *et al.*, 2000, Sovacool, 2008). Cependant, pour toutes les centrales électriques (charbon, nucléaire, hydro, solaire, éolienne) le système suivant est considéré depuis l'extraction des matériaux jusqu'au démantèlement (Seresova *et al.* 2020) cf. Fig.5

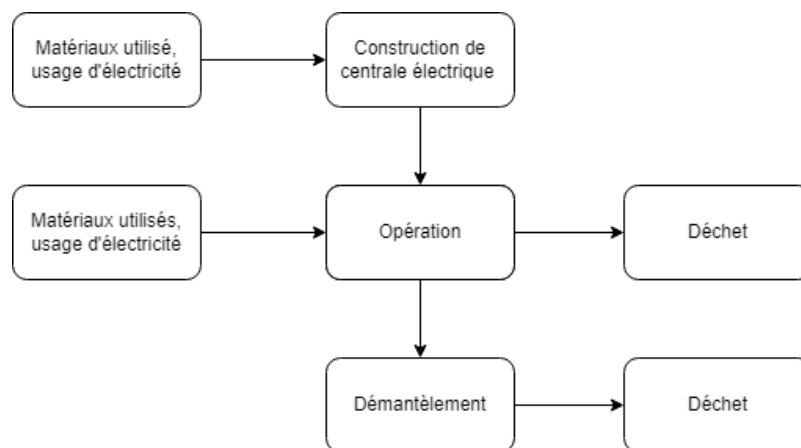


Figure 5 : Système général des centrales électriques inspirées de (Sersova *et al.* 2020)

Il existe 3 types de fins de vie durant le cycle de vie d'un CNPE : **démantèlement immédiat, fermeture sécurisée, confinement**⁴ (International Atomic Energy Agency. (2002)). Le choix du type de démantèlement contribue à la variation sur les données d'impact. En effet, le type de démantèlement influe directement sur la durée du processus. Le choix type de démantèlement dépend de plusieurs facteurs, tels que le nombre de réacteurs qui influe sur la quantité de déchet nucléaire. (IAEA, 2002). De ce fait, un petit CNPE ayant une solution rapide pour les déchets très faiblement radioactifs utilise l'option du démantèlement immédiat. Tandis que les autres centrales nucléaires peuvent choisir l'option d'un démantèlement différée qui s'étend sur la durée (IAEA 2002). Le choix du type de démantèlement peut dépendre aussi de son aspect financier. De ce fait, certains pays ne peuvent pas se permettre de démanteler immédiatement (Bond *et al.*2003)

ii. Déconstruction

La déconstruction se divise en 2 parties, les bâtiments conventionnels et nucléaires. Certains estiment que la déconstruction des parties conventionnelles émet 2% d'énergies comparativement à celles de la construction (Voorspools, 2000).

Le traitement des déchets conventionnels est pris en compte dans les différentes publications analysées, cependant l'étude de Koltun *et al.* 2018 ne prend pas en compte le traitement de déchets conventionnels dans le cadre du démantèlement.

iii. Assainissement

L'assainissement est la partie la plus longue du démantèlement (EDF 2020) et demande plus d'efforts à cause de la réglementation en vigueur liée au processus d'assainissement (Seier. 2014) Le sujet de la catégorisation des déchets rentre en jeu, compte tenu du coût de stockage et de la quantité de déchets produits lors du démantèlement (CEA, 2018)

Des recherches sur le traitement et la décontamination ont été entreprises. Il est à noter que la quantité de produit utilisé lors du démantèlement est inconnue. Pour le démantèlement de la CNPE de Fessenheim, l'information sur le type de processus d'assainissement n'a pas été trouvée. Cependant plusieurs types de traitement et de décontamination des sols, des structures et des effluents aqueux ont été trouvés : (Liu *et al.* 2022). On peut citer : Gels de nappage pour la décontamination minéraux, l'usage de mousses de décontamination, laser (l'Aspilaser®), CO2 supercritique, systèmes extractants du césium, mousses de flottation, filtration (eau), Oxydation Avancée (eau)

iv. Traitement des déchets radioactifs

Le nombre de démantèlements de CNPE est en croissance, il devient indispensable de gérer les déchets radioactifs liés aux activités. Il ne faut pas négliger le fait que, le traitement des déchets radioactifs lors du démantèlement présente un risque financier, logistique et humain comme les incidents à Cadiz ou le lac de Karachay qui ont couté 132 et 263 millions\$ respectivement (Koltun *et al.*, 2018). En effet, la variation doses/risque peut être impactée même avec une petite variation de concentration en radioactivité sur le sol (Kim *et al.* 2020). Il est donc impératif d'avoir le contrôle de ce processus. L'aspect du traitement de déchets radioactifs durant le démantèlement est essentiel dans l'ACV. Effectivement, il existe des études qui ne prennent en compte que le dépôt de déchets nucléaires, le recyclage et sa

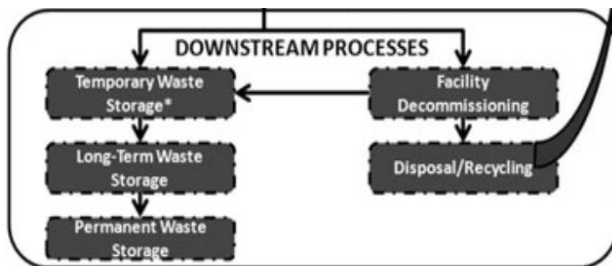
⁴ Démantèlement immédiat : Démantèlement après l'arrêt des opérations dans le CNPE sans délai
Fermeture sécurisée : Démantèlement différé, utilisé lors d'un arrêt définitif d'un parti d'un CNPE
Confinement : Stratégie de démantèlement « minimum » (combustible), lors du manque de fond

gestion dans le sous-système de démantèlement (Koltun *et al.* 2018). Cependant, il est important de noter que l'estimation de la quantité de déchets lors du démantèlement se base sur d'anciennes bases de données, tel que des données suisses de 1990. (Dones *et al.* 2005)

Cette gestion de déchets issus du démantèlement doit être réalisée en respectant 4 principes :

- « - La garantie de la traçabilité des déchets issus des installations nucléaires (zonage, déchets, caractérisation, contrôle) ;
- La minimisation du volume des déchets produits ;
- L'optimisation de leur catégorisation ;
- L'envoi des déchets vers les centres de stockage existants. Dans le cas où les déchets ne disposent pas d'exutoire, ceux-ci sont entreposés dans des installations dédiées. (ANDRA.2019) »

Le processus de stockage de déchets radioactifs se divise en plusieurs parties (Temporaire, Long terme, Permanent) (Warner. 2012) (figure 6). Le processus de « stockage intermédiaire » qui permet de réduire le taux de radioactivité de déchets avant le stockage final (Warner 2012, Seier. 2014, Wallbridge. 2012). Il existe un réel enjeu sur le sujet de la catégorisation des déchets compte tenu des coûts et des capacités de stockage limitées. (CEA. 2018)



Traduction :

- Temporay Waste Storage : Stockage temporaire de déchet
- Long term Waste Storage : Stockage de déchet à long terme
- Permanent Waste Storage: Stockage final de déchet
- Facility Decommissioning: Demantelement
- Disposal/Recycling: Recyclage/traitement

Figure 6 : Sous système de (Warner et Heath 2012)

Ces déchets sont classés selon leur taux d'activité et leur durée de vie (cf Fig.7). Ces classifications permettent de définir les modalités de transport, de condition de stockage, le lieu du stockage et la durée du stockage.

	Vie Courte (VC) < 30 ans	Vie Longue (VL) > 30 ans
Très Faible Activité (TFA) < 10 ² Ci/t	TFA	
Faible Activité (FA) < 10 ² Ci/t (βγ) ; < 0,1 Ci/t (α)	FA-MA-VC	FA-VL
Moyenne Activité (MA) < 10 ⁴ Ci/t (βγ)		MA-VL 4 % radioactivité 5 % volume
Haute Activité (HA) 10 ⁵ Ci/t (βγ) ; 10 ⁴ Ci/t (α)	HAVL 96 % radioactivité 0,2 % volume	

Figure 7 Classification des déchets (CEA 2018)

II. Étude de la catégorie d'impact :

1. Réchauffement global

Durant son cycle de vie, un CNPE limite l'impact sur le réchauffement global. En effet, une étude traitant l'ACV d'un parc à éolienne sur mer explique que malgré les avantages économiques des éoliennes, les émissions de GES de celles-ci sont plus élevées que celles d'un CNPE au cours de son cycle de vie (ex :16.4–28.2 gCO₂ eq./kWh comparée à 10.9–13.9 gCO₂ eq./kWh) (Li *et al.* 2021). Cependant, malgré le fait que l'utilisation du nucléaire dans la production d'énergie à un effet bas en émission GES, Poinssot *et al.* 2016 explique qu'il est possible de baisser les émissions en optimisant les transports de déchets en encourageant l'usage de véhicules à basse émission. En effet, Poinssot *et al.* 2016 argumente que la transportation de déchets contribue significativement aux émissions de GES totale.

Les littératures présentent des contradictions quant aux émissions de CO₂ : pour Wang *et al.* 2019, le démantèlement du CNPE est le plus grand contributeur d'émission de CO₂ ; pour Pehl *et al.* 2017, « la construction et l'opération sont les seules sources de émissions au CO₂ ». Les résultats diffèrent selon le comportement et la durée de vie choisie pour l'utilisation de la CNPE. Nous pouvons illustrer cela avec l'étude de (Pomponi and hart, 2021) avec un impact de 18.82gCO₂e/kWh_e [92%-60ans] / 35.15 gCO₂e/kWh_e [74%-40ans] (pour la méthode input-output) sans compter la fin de la vie. Le type de méthodologie contribue à la variation des valeurs. Un article traitant le sujet de l'ACV appliquée à un EPR a des valeurs de GES qui diffèrent selon le type d'ACV⁵ (Pomponi et Hart, 2021) : 16.55–17.69gCO₂e/kWh (process), 18.82–35.15gCO₂e/kWh (input-output), 24.61–32.74 gCO₂e/kWh (Hybrid)

« Les procédés de recyclage additionnel » pendant un démantèlement ont des impacts liés aux émissions de GES (0.4 à 0.5g CO₂/kWh) (Hondo, 2005). En effet, Hondo (2005) prend en compte le stockage, le traitement et la revalorisation de déchets hautement radioactifs tel que les combustibles nucléaires issus du démantèlement.

La figure 8 illustre toutes les données bibliographiques d'émission CO₂eq/kWh lors du démantèlement. Les résultats s'expriment en CO₂ équivalent, les études prennent en compte les émissions de CO₂, CH₄, SO_x, NO_x, CO, TPM (Wang *et al.* 2018, Siddiqui et Dincer, 2017). En effet, le champ de l'étude influe sur la variation des résultats (Paulilio, 2018, Seier, 2014). Pour faciliter la comparaison des résultats, les études utilisent le coefficient de variation adaptée à chaque étude. Ceci est un facteur afin d'avoir une échelle d'invariances (Wang *et al.* 2021) (Lenzen *et al.*, 2018)

2. Écotoxicité aquatique

Aucun article traitant le sujet de rejet/émission sur l'eau en utilisant ACV, lors du démantèlement n'a été répertorié durant cette recherche. Cependant, il existe une étude de cas soulignant la présence de radionucléides dans le sol et l'eau après l'arrêt du CNPE de Salapilis. (Riekstina *et al.* 2016). Les éléments chimiques analysés sont : Cs-137 pour la terre (-140Bq/kg), ³H dans l'eau dans une vaste gamme (5-8000Bq/l) et l'activité Beta en général (<0.35Bq/l)

⁵ Process LCA : Analyse ascendante de l'ICV, qui consiste à développer un inventaire grâce à des données sur les process industriels du cycle de vie d'un produit et sur les flux physiques reliés
Input-output : Analyse descendant de l'ICV en utilisant les données sur les flux élémentaires
Hybrid LCA : Combinaison de Process LCA et Input Output

Le rejet des éléments chimiques, toxique dans l'eau, contribue à la pollution de l'eau. Ceci est dû à 89% des opérations d'extractions avec le sulfate, puis l'occupation des réacteurs (8%) (Poinssot *et al.* 2014). Nous ne devons pas négliger la possibilité de pollution accidentelle de l'eau qui est présente. Comme l'incident de décembre 2014, pendant la période de démantèlement (Riekstina *et al.* 2016). Un article illustre le ratio des catégories d'impacts pour un CNPE (Figure 9).

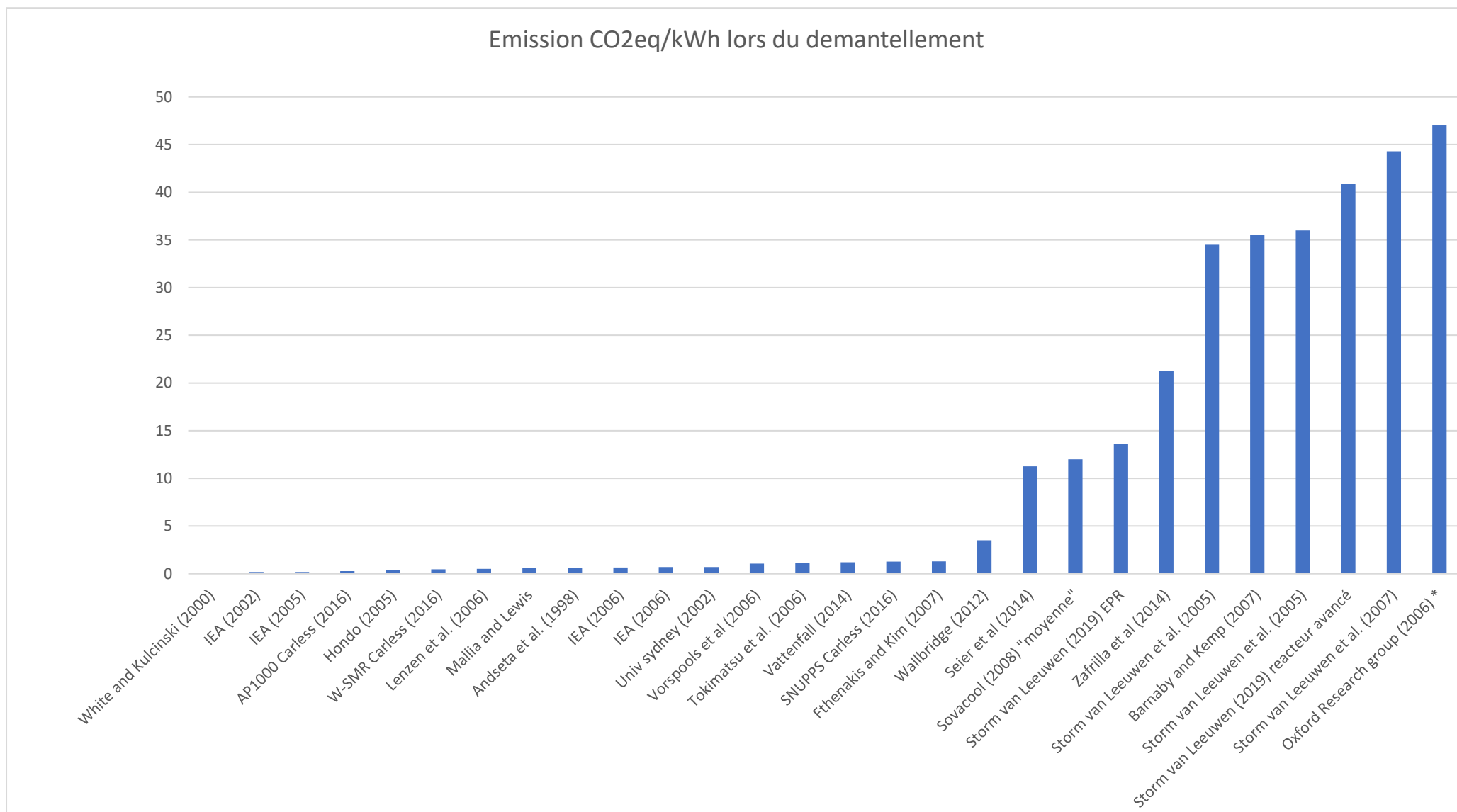
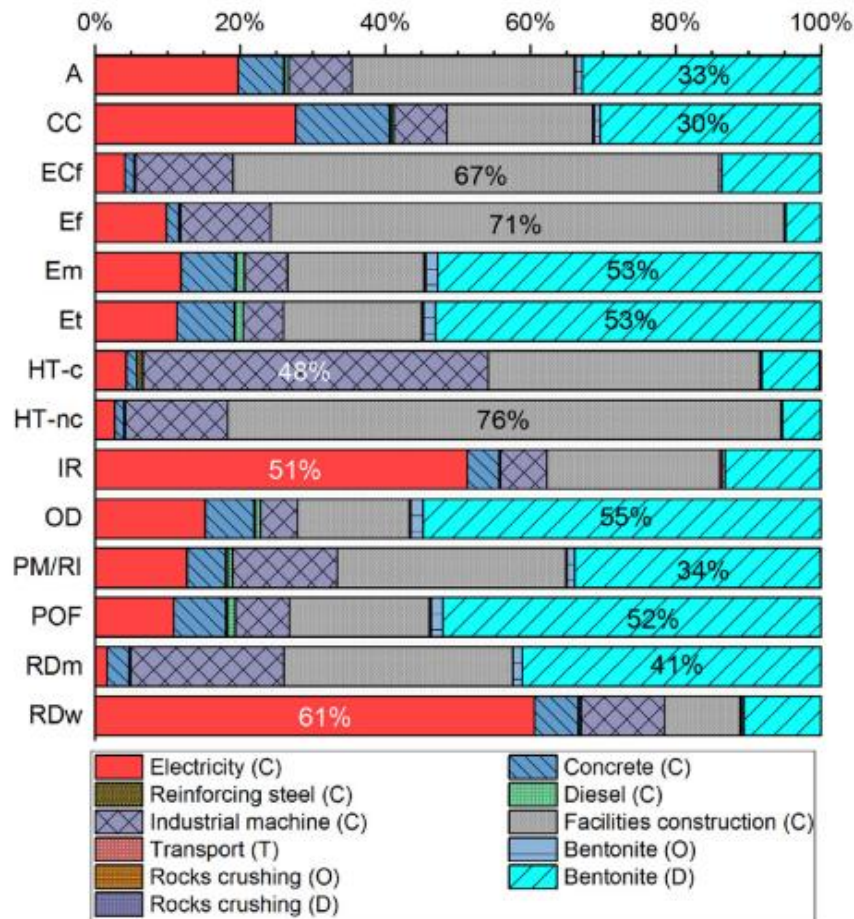


Figure 8 Variation de l'Émission CO₂eq/kWh lors du démantèlement



Légende :

- Acidification (A) [Mole of H+ eq.]
- Climate change (CC) [kg CO2 eq.]
- Ecotoxicity freshwater (ECf) [CTUe]
- Eutrophication freshwater (Ef) [kg P eq.]
- Eutrophication marine (Em) [kg N eq.]
- Eutrophication terrestrial (Et) [Mole of N eq.]
- Human toxicity, cancer effects (HT-c) [CTUh]
- Human toxicity, non-cancer effects (HT-nc) [CTUh]
- Ionising radiations (IR) [Bq U235 air eq.]
- Ionising radiations, waste (IRw) [Bq U238 ILW eq.]
- Ozone depletion (OD) [kg CFC-11 eq.]
- Particulate matter/respiratory inorganics (PM/RI) [kg PM2.5 eq.]
- Photochemical ozone formation (POF) [kg NMVOC]
- Resource depletion, mineral, fossils and renewables (RDm) [kg NMVOC]
- Resource depletion water (RDw) [m3 eq.]

Figure 9 Analyse des ratios des catégories d'impact pour la C : Construction ; O : Operation ; T : Transport ; D : Démantèlement pour la CNPE GDF (Paulilo et al. 2020)

III. Proposition/Problématique

Le sujet de l'analyse de cycle de vie appliqué au démantèlement d'une centrale nucléaire est un sujet très complexe avec beaucoup d'enjeux : sociétaux, économiques et environnementaux. En effet, EDF annonce que le démantèlement de 14 réacteurs nucléaires est prévu d'ici 2035 (dont Fessenheim) ; ce qui nécessite des retours d'expérience en la matière. Dans le cadre du démantèlement du CNPE de Fessenheim, il a été décidé d'effectuer une analyse de cycle de vie (ACV) afin d'évaluer les dommages sur le changement climatique, la qualité de l'écosystème, les ressources naturelles et la santé humaine. Cet objectif général s'accompagne de différents verrous scientifiques à lever. En effet, il existe peu d'études qui traitent uniquement l'ACV du démantèlement de CNPE et beaucoup d'entre elles se basent sur des approximations. Ces dernières se traduisent par des estimations des données d'inventaire ou encore une estimation par rapport à l'énergie utilisée durant la construction de la centrale nucléaire.

Plusieurs questions à traiter lors de cette étude :

Premièrement, le choix de l'unité fonctionnelle : En effet, la plupart des études ont comme unité fonctionnelle le : MWh. Cependant, les 2 seules études étudiant le démantèlement utilisent comme unité fonctionnelle « le démantèlement de la centrale nucléaire » (Wallbridge,2012) (Sieier 2014). Cependant, les études d'ACV doivent être comparable avec les résultats des autres études (Wenzel *et al.* 2004). Cela pourrait être difficile avec MWh puisque chaque centrale nucléaire produit une quantité différente d'énergie.

La deuxième est le choix de la limite et cadre de l'étude : il a été constaté que les frontières et limites de cet ACV dépendent de l'objectif d'étude.

Expression du besoin d'études sur le démantèlement des CNPE

1. Présentation Générale

Le Centre Nucléaire Production d'Énergie de Fessenheim est composé de 2 réacteurs à eau pressurisée (REP) d'une puissance de 900MW. Elle a été mise en service le 30 décembre 1977 et le 18 mars 1978. La CNPE se situe sur le Rhin, entre la France et l'Allemagne et est à moins de 100km de la Suisse (cf. Fig. 10).

Après plusieurs reports de date de fermeture, la CNPE est mise en arrêt le 30 juin 2020. Elle a eu une production totale de 447.3TWh depuis son ouverture à sa fermeture⁶.



Figure 10: Localisation de la CNPE

L'installation nucléaire de base (INB) s'étend sur une superficie de ~36 ha avec les bâtiments nucléaires et les bâtiments conventionnels. Les bâtiments nucléaires sont composés de 2 bâtiments réacteur (BR), 2 bâtiments combustibles (BK), des bâtiments annexes (BW) et 1 bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN) et enfin 1 bâtiment électrique avec 2 salles de commande qui sont communes aux 2 tranches.

⁶ IAEA Fessenhiem 1 et Fessenheim 2

Les bâtiments conventionnels sont composés de salles des machines, bâtiments industriels et bâtiments dits « tertiaire » (cf. Fig. 11)

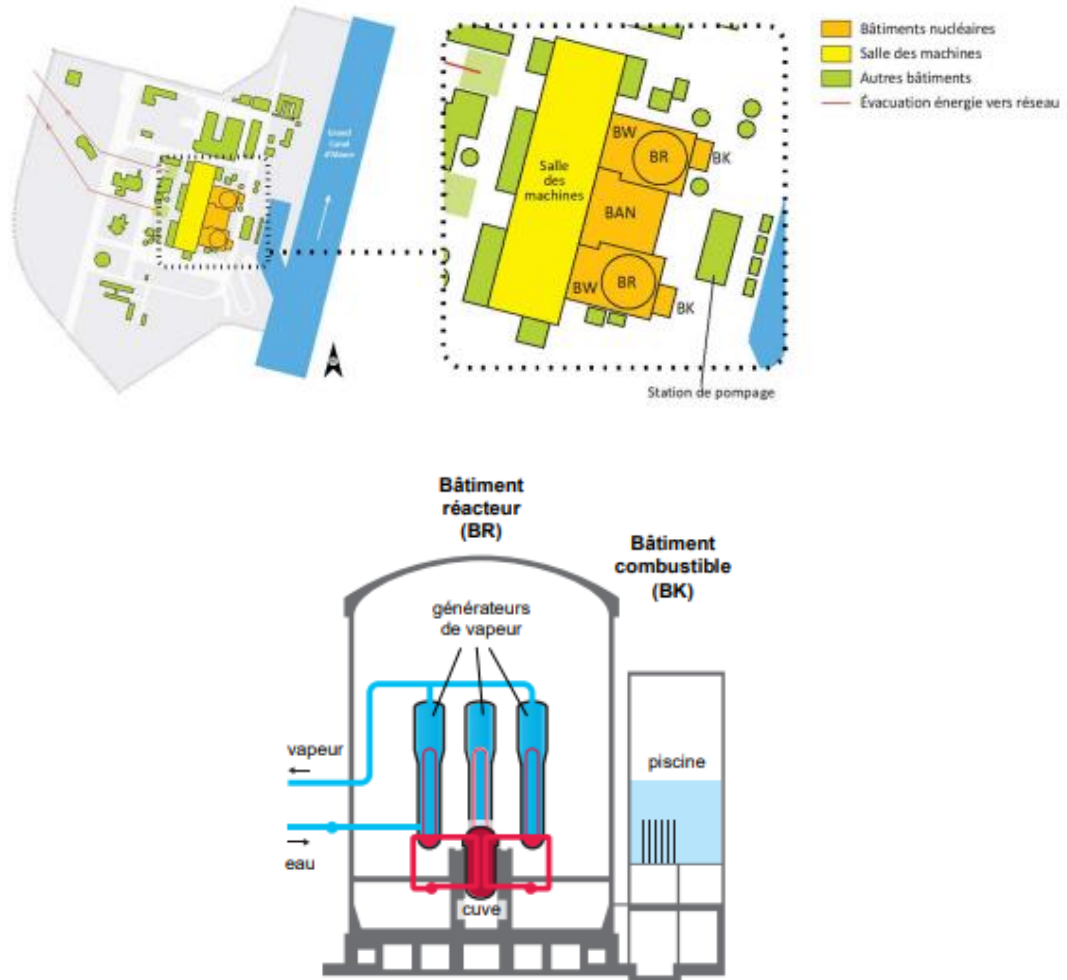


Figure 11 : Composition des bâtiments au CNPE de Fessenheim (EDF 2020)

2. Processus de démantèlement

EDF a fait le choix de procéder à un démantèlement immédiat qui permet de procéder à l'évacuation et au traitement de matières/déchets radioactifs à la suite de l'arrêt du CNPE (EDF, 2020). La solution de démantèlement différée implique quant à elle de mettre en confinement plusieurs parties des installations pendant plusieurs décennies (30 à 100 ans) afin de faire chuter le taux de radioactivité.

À la suite de l'arrêt définitif du CNPE, EDF est entrée dans une phase de Préparation au Démantèlement (PDEM) qui a pour objectif d'évacuer les combustibles au sein des bâtiments nucléaires et de procéder à une décontamination du circuit primaire (20000m² par tranche) (cf. Fig. 12). À la suite de la phase de PDEM, le démantèlement qui débutera en 2025 pendant une durée de 15 ans se fera en 4 étapes :

- Étape 1 : démantèlement électromécanique
- Étape 2 : l'assainissement des structures
- Étape 3 : la démolition des bâtiments
- Étape 4 : la réhabilitation des sols

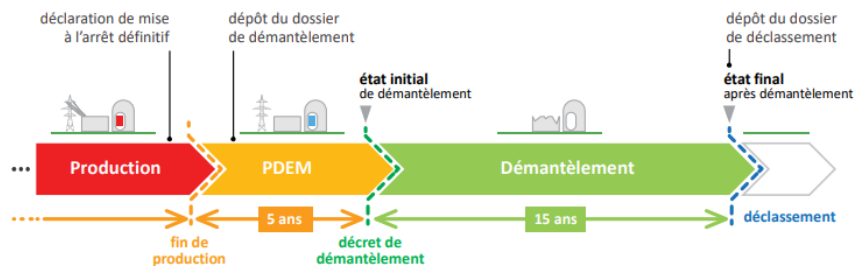


Figure 12 : Organisation de la fin de vie du CNPE de Fessenheim (EDF 2020)

3. Gestion des déchets issus du démantèlement

Le démantèlement du CNPE de Fessenheim va produire environ 450 000 tonnes de déchets en total. Nous allons compter 95% de déchets non radioactifs, dits conventionnels (ex. : béton et métaux). Il est à noter que EDF a pour objectif de valoriser grâce au recyclage et à la réutilisation l'ensemble des déchets conventionnels. L'objectif de cette valorisation est fixé à 90% (EDF, Rapport 2020). Cependant, le démantèlement produira 5% de déchets à caractère radioactif. Ces déchets sont soumis à différentes conditions de tri, conditionnement et entreposage selon leur degré de radioactivité. EDF estime que la quantité de déchets radioactifs totale est de 18400 tonnes. La composition des déchets radioactifs est la suivante :

- 3% déchets très faible activité (TFA) soit 12000 tonnes (site de stockage CIREs)
- 2% déchets faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC) soit 6200 tonnes (site de stockage CSA)
- 0,1% déchets moyenne activité à vie longue (MA-VL) soit 200 tonnes (ICEDA -> site de stockage Cigéo)

Il est à noter que le démantèlement ne génère pas de déchets de haute activité (HA)

Chaque catégorie de déchets radioactifs à ses propres lieux de stockage :

- TFA : CIREs à Morvillier (Aube)
- FMA-VC : CSA à Soulaines-Dhuys (Aube)
- MA-VL : ICEDA à Bugey (Ain)

Définition des objectifs et champs de l'étude

I. Méthodologie d'approche

1. ACV : Cadre conceptuel

Afin d'évaluer et estimer les impacts environnementaux lors de cette dernière phase de la vie du CNPE de Fessenheim, il a été décidé d'utiliser la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Cette méthodologie est standardisée et définie par les normes d'ISO 14040 et ISO 14044, issue en 2006 et révisée en 2020. (NF EN ISO14040. 2020 et NF EN ISO14044. 2020)

L'ACV se divise en 4 parties (cf- Figure 13⁷) :

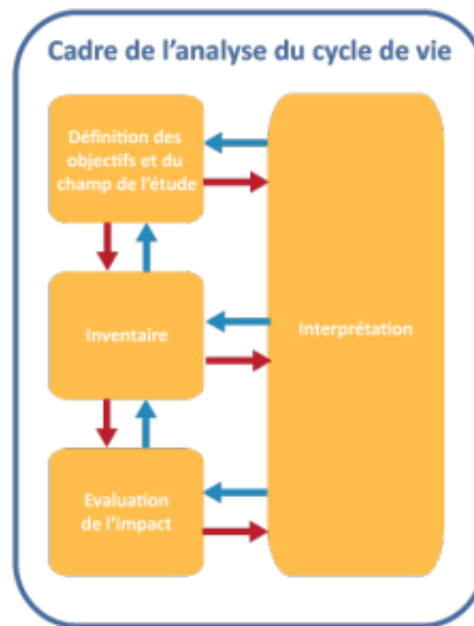


Figure 13 : Les principales étapes de l'Analyse du Cycle de Vie et leur cadre méthodologique (Univ. Valenciennes, 2012)

1. Définition des objectifs et champs de l'étude :

Cette étape est la première phase de l'analyse de cycle de vie, car elle permet de définir le but de l'ACV. Elle permet de poser les bases de l'étude, de définir la fonction du système et son unité fonctionnelle, ainsi que les limites spatiales et temporelles du système étudié.

2. Analyse de l'inventaire

L'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) est considéré comme l'étape la plus cruciale et la plus chronophage lors d'une ACV. Il s'agit d'identifier et calculer les flux d'entrée et de sortie du système. Les données d'entrées (ou inputs) concernent les flux d'énergie (électricité, gaz, diesel, ...) et de matière (eau, produit chimique, ...). Les données de sorties (ou outputs) quantifient les émissions à l'atmosphère, les rejets aquatiques, les déchets et les produits finis et co-produits.

⁷ Image: http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_030_1-3.html

3. Évaluation de l'impact

Durant cette étape les données d'inventaires (facteurs d'impact) sont caractérisées en termes de contributeurs à différentes catégories d'impact. Les impacts (mid-point) sont quantifiés ainsi que les dommages (end-point). Différentes méthodes de calculs existent au sein de différents logiciels d'ACV tel que SIMAPRO.

4. Interprétation.

Cette dernière étape permet d'émettre un bilan grâce aux résultats obtenus lors de l'évaluation des impacts. Il permettra d'apporter des conclusions aux questions posées durant la définition des objectifs et des recommandations en termes de gestion environnementale.

2. Définition des objectifs et champ de l'étude

i.Objectif

Le projet a pour but d'évaluer et d'effectuer une modélisation prospective des impacts environnementaux lors de la phase de fin de vie du CNPE de Fessenheim. Cette modélisation a pour but d'aider à la décision politique en matière de gestion de déchets radioactifs et de gestion environnementale territoriale. Cette étude permettra aussi de comparer les résultats avec les autres études traitant le démantèlement de Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE).

ii.Unité Fonctionnelle

Pour le choix de l'unité fonctionnelle, l'analyse fonctionnelle descendante discutée dans la section {Unité fonctionnelle (UF)} va être utilisée (cf.figure 14). Ce diagramme permet de savoir le but de notre processus élémentaire et de définir une unité fonctionnelle grâce au type de processus qui constitue notre système.

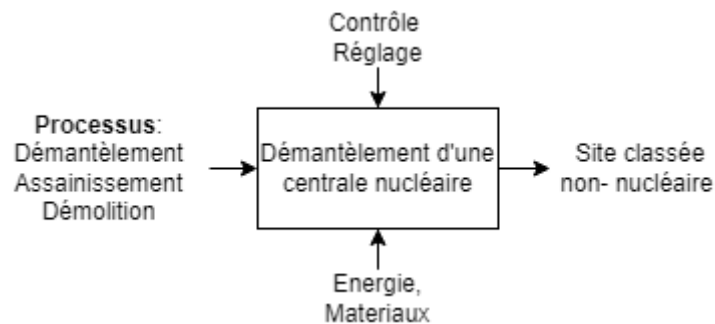


Figure 14 : Analyse fonctionnelle descendante d'un démantèlement d'un CNPE

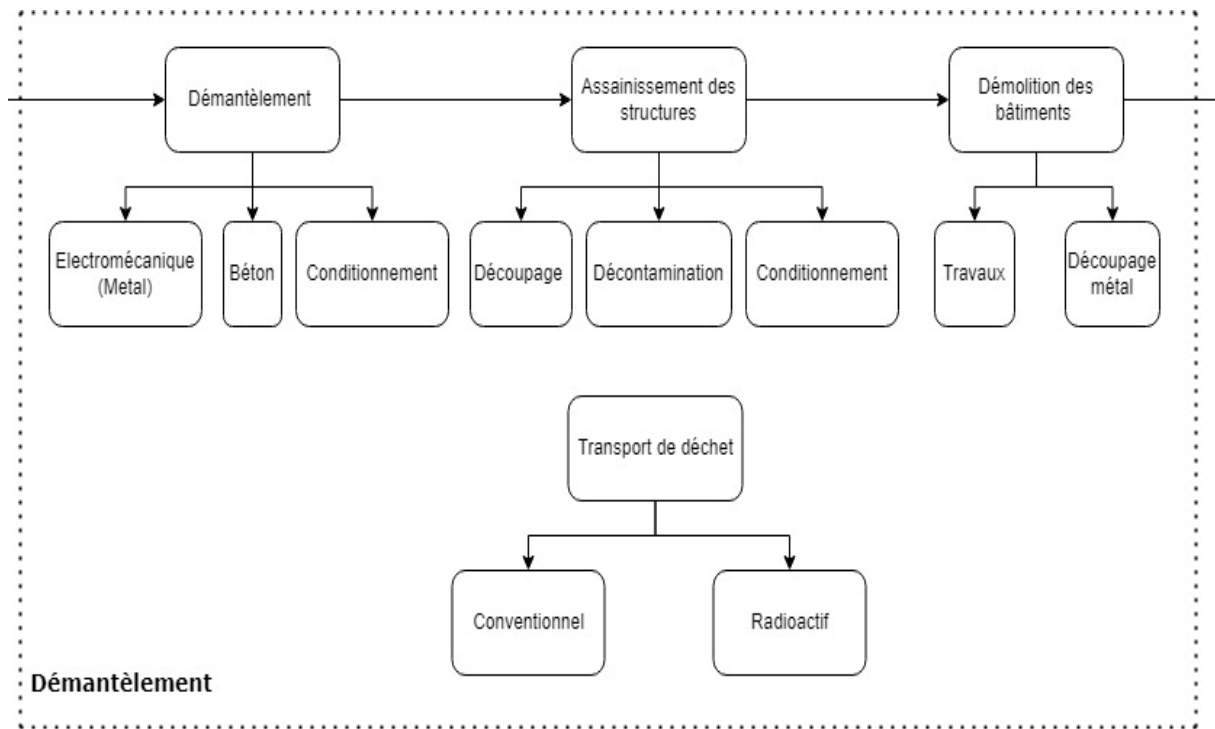
Grâce à la bibliographie et au diagramme SADT, il existe deux propositions pour une unité fonctionnelle qui sont le « Wh » et « Le démantèlement d'une centrale nucléaire (Fessenheim) »

L'utilisation de l'unité fonctionnelle « Le démantèlement d'une centrale nucléaire (Fessenheim) » a été choisie. Cette décision est motivée par le fait que le « Wh » ne permet pas de comparer avec les autres études. En effet, la quantité d'énergie produite est différente selon la durée de vie et la cadence du CNPE. [A,II,1]

iii. Système

Dans la limite de l'étude, seul le processus de démantèlement a été pris en compte. Soit : le démantèlement (électromécanique), l'assainissement des structures, la démolition des bâtiments et le transport des déchets. En effet, il a été décidé d'exclure la 4ème étape du démantèlement (EDF, 2020) « la réhabilitation des sols », la préparation au Démantèlement (PDEM) et le traitement de déchets tels que le recyclage.

La figure 15 décrit le système et ses sous-systèmes.



Limite du système

Figure 15 : Limite du système de l'ACV

II. Analyse de l'inventaire

Pour les données de l'inventaire, nous allons nous fier principalement aux données disposées par EDF dans son rapport du démantèlement (EDF, 2020). Cependant, EDF ne procure pas d'information sur les types/techniques d'assainissement et sur la quantité de produits d'assainissement utilisés lors de cette phase. En effet, les données liées aux entrées de matières et d'énergies sont rares. Ceci est dû à la quantité faible d'études sur ce sujet, mais aussi dû au fait que les données soit propre à chaque CNPE et donc, difficilement applicable tel quelles au projet de démantèlement de Fessenheim.

L'inventaire de cycle de vie (cf : Tableau ii) est constitué d'un rassemblement de données provenant de différents documents tels que les rapports de démantèlement (EDF, 2020) (EWN, 2008), d'articles scientifiques et d'estimation de distances de transports de déchets radioactifs grâce aux cartes routières et ferroviaires (cf. Tableau 1). La base de données suisse « Ecoinvent3 »⁸ est utilisée pour les données d'entrées dans cette étude. :

⁸ Ecoinvent3 : Base de données où les échanges avec l'environnement des processus unitaires ou un système. Ils sont représentés sous plusieurs formes (marché, production, transformation...).

Auteur	Nature des données	Sujet étudié
Bozdağ	Consommation d'électricité par m ²	Consommation d'énergie des bâtiments lors de leurs cycles de vie
EDF	Quantité de déchets conventionnels et radioactifs	Plan de démantèlement du CNPE de Fessenheim
ANDRA	Quantité de mortier besoin Modalité de transport de déchet radioactifs	Règlementation liée aux classifications des déchets nucléaires, leurs conditionnements et leurs transport
Rohde (EWN)	Assainissement Découpage de métal	Démantèlement du CNPE Lubmin
Lunser/Seier	Quantité de diesel besoin pour le béton	Démantèlement du CNPE Lubmin
Koltun	Quantité de différents types de déchets conventionnel	ACV du CNPE GT-MHR ⁹
Open Street Map	Superficie des bâtiments du CNPE de Fessenheim	Carte « open source » avec image satellite
Open Railway Map	Distance pour le transfert des déchets radioactifs Source d'énergie pour les trains	Carte « open source » des chemins de fer

Tableau 1 : Liste des données issues de la littérature afin de développer l'inventaire

⁹ Réacteur à hélium modulaire

Analyse du cycle de vie (ACV) prospective du démantèlement du CNPE de Fessenheim

	Démantèlement			Assainissement			Démolition		Transport de déchet	
	Entrée d'énergie									
Type de traitement	Électromécanique	Béton	Conditionnement	Décontamination	Découpage	Conditionnement	Traveau	Découpage metal	Démolition	Radioactif
Energie totale(kwh)	-	-	-	-	-		414166	-	-	-
Diesel total (l)	-	6699.8	-	-	-		1311811	-	-	-
Transport en (tkm) route	-	-	-	-	-		-	-	15120000	61014800
Transport en (tkm) train électrique	-	-	-	-	-		-	-	-	73800000
Transport en (tkm) train diesel	-	-	-	-	-		-	-	-	5200000
	Entrée de materiaux									
Oxygène (m ³)	34426	-	-	-	2979.1		-	265735	-	-
Acétylène (m ³)	18118.5	-	-	-	1567.9		-	139861	-	-
Hydrogène (m ³)	3623.7	-	-	-	313.6		-	27972	-	-
Argon (m ³)	3623.7	-	-	-	313.6		-	27972	-	-
Eau (m ³)	-	-	-	1280	-		-	-	-	-
steel gravel (tonne)	-	-	-	61.4	-		-	-	-	-
Acide phosphoreux (m ³)	-	-	-	30	-		-	-	-	-
Acide oxalique (tonne)	-	-	-	16.6	-		-	-	-	-
Mortier pour FAMA VC (tonnes)	-	-	129773	-	-	15987	-	-	-	-
Mortier pour MAVL (tonnes)	-	-	911.1	-	-		-	-	-	-

Tableau 2: Inventaire de Cycle de Vie

Seule la phase de démolition produit des déchet conventionnels (non-radioactifs). Ainsi que les phases de démantèlement et d'assainissement émettent uniquement des déchets radioactifs (Très Faible Activité (TFA), Faible Activité Moyenne Activité – Vie Courte (FAMA-VC), Moyenne Activité – Vie Longue (MA-VL)).

1. Démantèlement

Electromécanique :

Le rapport d'EDF ne fournit pas d'informations précises sur les spécificités de cette phase. Cependant, la quantité de déchets radioactifs métalliques en phase de démantèlement est donnée dans ce rapport (EDF, 2020). Le rapport de Rohde (EWN, 2008) a été utilisé afin de connaître les quantités d'oxygène, d'acétylène, d'hydrogène et d'argon nécessaires à la découpe des métaux. Toutefois, le rapport de Rohde (2008) donne la quantité de matière utilisée lors du découpage des métaux en nombre de « bouteille de matière » par an et la masse de déchets découpés par an.

Une transposition des valeurs de Rohde utilisées pour le CNPE de Lubmin à celles du CNPE de Fessenheim a été faite. Pour avoir une quantité de matière précise, il a été supposé de prendre comme volume de 10 m³ dans une bouteille de matière. Afin de pouvoir mettre ces inputs dans le logiciel « SIMAPRO », la transformation en tonnes a été requise. Cette transformation a été faite grâce à la formule des « Gaz parfait »

$$^{10} PV = nRT$$

Formule 1: Gaz parfait

Béton :

Le rapport d'EDF fournit la masse de déchet radioactifs en béton durant la période de démantèlement. Lunser (1999) et Seier *et al* (2014) expliquent que 4,82 litres de diesel par tonnes de béton sont nécessaires dans le démolissement du béton. Cette valeur fournie par ces auteurs a été ainsi rapportée à la quantité de béton issue lors du démantèlement du CNPE de Fessenheim.

Conditionnement de déchets radioactif :

Le volume et la masse des déchets radioactifs sont donnés par EDF dans leur rapport. L'ANDRA (2018) explique que le conditionnement de déchets radioactifs provenant des CNPE doit être établi par les producteurs. Un colis de déchets radioactifs FAMA-VC doit être conditionné avec 80% de son volume en mortier (matériau d'enrobage en ciment) et un colis de déchets MA-VL avec 82% de sa masse en mortier.

Les déchets TFA ne nécessitent pas de conditionnement particulier pour leurs transports. (ANDRA)

Afin de convertir le volume de mortier à la masse pour les déchets FAMA-VC la concentration du mortier¹¹ de 2200kg/m³ a été supposée.

2. Assainissement

Décontamination :

Afin de compenser le manque de donnée lié à cette étape, les données de Rhodes (EWN) ont été utilisées et rapportées à la quantité d'éléments radioactifs à traiter pour le CNPE de

¹⁰ **P**: la pression (Pa); **V** : le volume du gaz (m³) ; **n** : la quantité de matière (mol) ; **R** : la constante universelle des gaz parfaits (≈ 8,314 J K⁻¹ mol⁻¹) ; **T** : la température absolue ambiante (298.15K) .

¹¹ <https://www.lecasystem.fr/client/files/0000000001/1632.pdf>

Fessenheim. Les matériaux utilisés sont : l'eau, le granulats d'acier, l'acide phosphoreux ((HO)₂HP=O) et l'acide oxalique.

Découpage de métaux :

À l'image du traitement électromécanique lors de la phase de démantèlement, les données de Rhodes (EWN) ont été utilisées pour ramener la quantité de matière nécessaire à la masse de déchets métalliques produite lors de l'assainissement.

Conditionnement de déchets radioactif :

La phase d'assainissement ne produit pas de déchets dits « MA-VL ». Le rapport de EDF, fournit la quantité de déchets radioactifs produits lors des opérations d'assainissement. La quantité de mortier nécessaire a été calculée selon les modalités de conditionnement de l'ANDRA comme dans la section précédente.

3. Démolition

Travaux :

L'utilisation de diesel est calculée de la même manière que celle du traitement de béton lors du démantèlement. En effet, la valeur de 4.82 l par tonne de béton est rapportée à la masse de béton précisé dans le rapport de EDF (EDF, 2020)

La quantité d'électricité nécessaire à la démolition est calculée en utilisant le kWh/m². Bozdağ (2007) estime que pour démolir un bâtiment, 11kWh/m² sont nécessaires. Afin d'avoir la valeur de l'énergie totale, la superficie des bâtiments doit être connue. Grâce à Open Street Map une estimation de la superficie en 2D et la hauteur des bâtiments a été réalisée. Grâce à cela, différents calculs ont été faits afin de trouver la surface des murs et sols des bâtiments (voir Annexe 2). La surface totale trouvée est de 37651m² et cette valeur a été multipliée par la valeur de Bozdağ.

Découpage de métal :

De la même façon que l'assainissement, les données de Rhodes (EWN) ont été utilisés pour ramener la quantité de matière nécessaire à la masse de déchets métalliques conventionnels. Contrairement aux sections précédentes, la quantité de déchets conventionnels métalliques n'est pas précisée dans le rapport de démantèlement. La proportion de déchets conventionnels issue de l'étude de Koltun *et al*, 2018 est utilisée afin de la rapporter à la masse de déchets issus du CNPE de Fessenheim.

4. Transport de déchets

Conventionnels :

Le transport de déchets conventionnels se fait par route. EDF met en avant sa politique de valorisation des déchets (recyclage). En effet, le CNPE à un taux de recyclage de 90.4% (EDF, 2020). Pour cette raison, le transfert de déchets doit se faire dans un centre de traitement de déchets avec une capacité de revalorisation adapté. Le centre le plus proche est à 42km du CNPE, au centre de traitement « CERNAY ENVIRONNEMENT ». La conversion a été faite en tkm en multipliant la masse de déchets totale (en tonne) ainsi que la distance entre le CNPE et le centre de traitement (idem pour les déchets *radioactifs*).

Radioactif

D'après la réglementation fixée par l'ANDRA, tous les déchets radioactifs sont acheminés par route (CIRES 317km du CNPE) (CSA 314km) sauf pour les MA-VL (ICEDA 395km), qui nécessitent un transfert par chemin de fer. Afin de calculer la distance requise pour les camions, Google Map a été utilisé. Cependant pour le transport ferroviaire, Open Railway Map a été utilisé afin de calculer les distances requises. Ce site web a aussi été utilisé pour connaître l'emplacement des voies ferroviaires électriques et des voies non électrifiées pour lesquelles le diesel est utilisé comme énergie.

Etude d'impact

I. Calcul et modélisation

La méthode de calcul choisie pour cette étude est la méthode "IMPACT 2002+ v2.15". Elle permet de calculer quatorze impacts et quatre dommages. Cette méthode de calcul découle de trois méthodes de calculs, qui sont : Eco-indicator 99¹², CML 2002¹³ et IPCC 2001¹⁴.

Impact 2002+, créé par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, est adaptée pour cette étude, car elle est européenne et permet d'évaluer aussi bien les catégories d'impact que les catégories de dommages.

Le logiciel « SIMAPRO 9.3 » est utilisé afin de calculer et de modéliser les différents impacts dans cette étude.

II. Sélection et choix des catégories d'impacts :

Une sélection des impacts est nécessaire afin d'avoir une analyse adéquate et alignée avec les objectifs et la limite de l'étude. Une simulation préliminaire sur le logiciel « SIMAPRO » avec comme méthode de calcul « IMPACT2002+ v2.15 » (cf Figure 16) est donc importante afin d'identifier ces catégories d'impact (les différentes catégories d'impacts sont expliquées dans l'annexe 1).

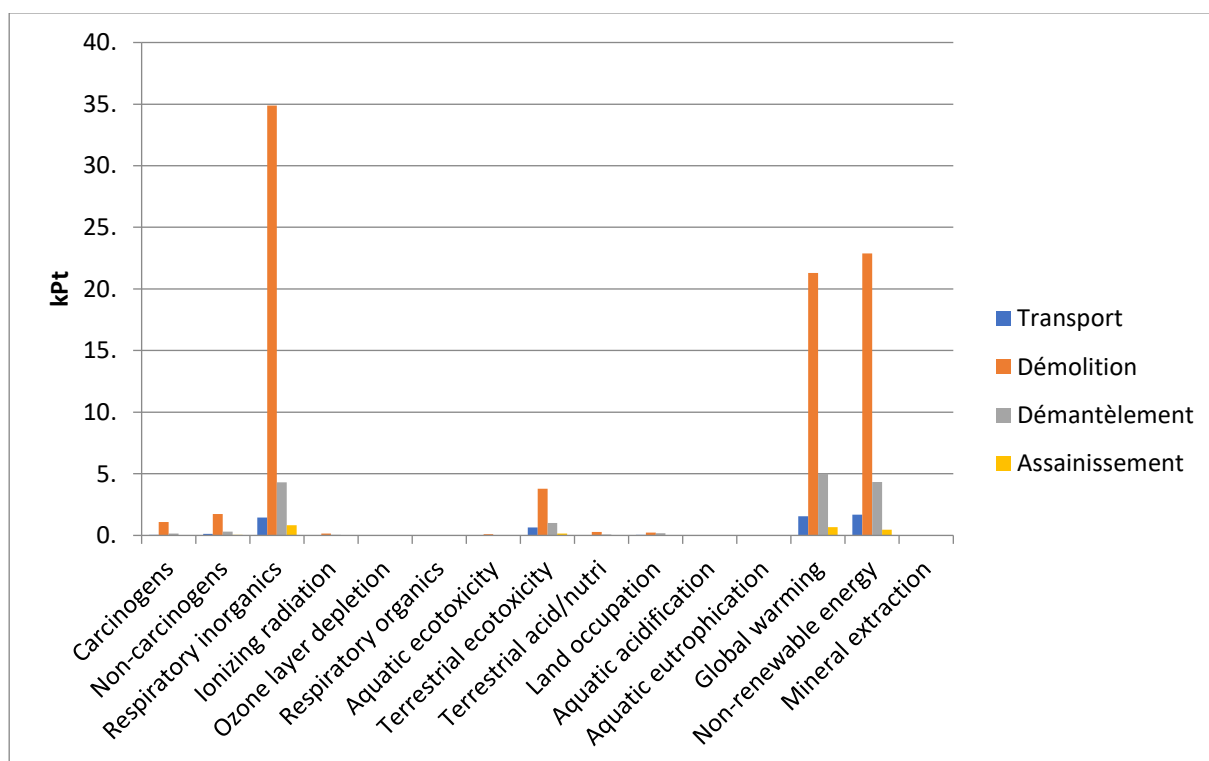


Figure 16 : Simulation préliminaire afin de sélectionner les catégories d'impact

Dans la figure 16 les différents processus sont comparés selon les catégories d'impact par l'unité « Pt, point ». Une unité de « point » représente l'impact d'une personne habitant en

¹² Eco-Indicator 99: Calcul adapté pour la santé humaine

¹³ CML 2002: Calcul pour l'Acidification aquatique et Eutrophisation aquatique

¹⁴ IPCC 2001: International panel of climate change, calcul adapté au changement climatique

Europe pendant une année. Pour les catégories d'impact liées aux dommages de la santé humaine, un unique « point » représente l'impact annuel moyen d'une personne dans le monde. Cette unité utilisée lors de la pondération permet de standardiser les résultats et facilite la comparaison. Grâce à cette simulation, une sélection de différentes catégories d'impact peut être établie : Les effets respiratoires causés par des composés inorganiques, l'écotoxicité terrestre, le réchauffement global et la consommation d'énergie non-renouvelable. En effet, le choix de ces catégories d'impact répond aux objectifs de l'ACV et respecte le critère de la non-redondance qui permet de sélectionner des catégories d'impacts qui sont indépendantes, les uns et les autres.

III. Évaluation des impacts

1. Démantèlement

L'étape de démantèlement se décompose en démantèlement d'équipement électromécanique, en démantèlement des structures béton et conditionnement des déchets. (cf . Figure 17)

Si le conditionnement des déchets contribue majoritairement aux effets respiratoires liés aux composés inorganiques, à l'écotoxicité terrestre et au réchauffement global, le démantèlement électromécanique est quant à lui le plus fort contributeur de la consommation d'énergie non renouvelable.

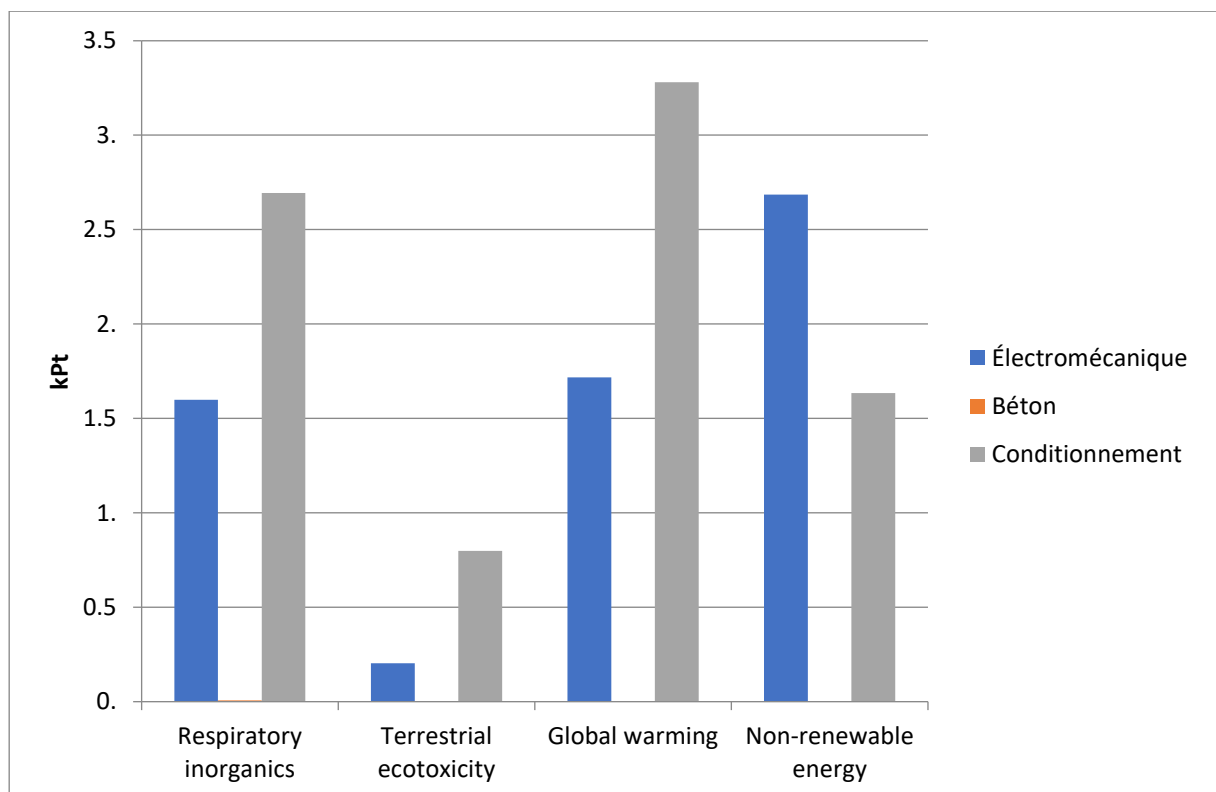


Figure 17 : Comparaison des impacts des traitements de démantèlement

Réchauffement global

Le procédé électromécanique a un impact, sur le réchauffement global, inférieur au conditionnement (1,7kPt et 3,3kPt respectivement). De plus, l'influence du procédé de traitement du béton est négligeable pour cette catégorie (inférieur à 0,01kPt).

L'impact du processus de découpage du métal lors du procédé électromécanique provient à 75,6% de la production de l'acétylène pour l'oxy-découpage ainsi qu'à 23,4% de l'usage de l'électricité. Pour le conditionnement, la majorité de l'impact est dû à la production du ciment (90,6%), et à son transport (5,73%). Le traitement du béton ne présente pas d'impact considérable sur le réchauffement global.

Les émissions de dioxyde de carbone dans l'air sont très importantes lors du démantèlement. Elles représentent 98% des émissions totales avec une valeur de 48203 t CO₂ eq¹⁵. Les substances restantes sont composées de méthane, de protoxyde d'azote et d'hexafluorure de soufre.

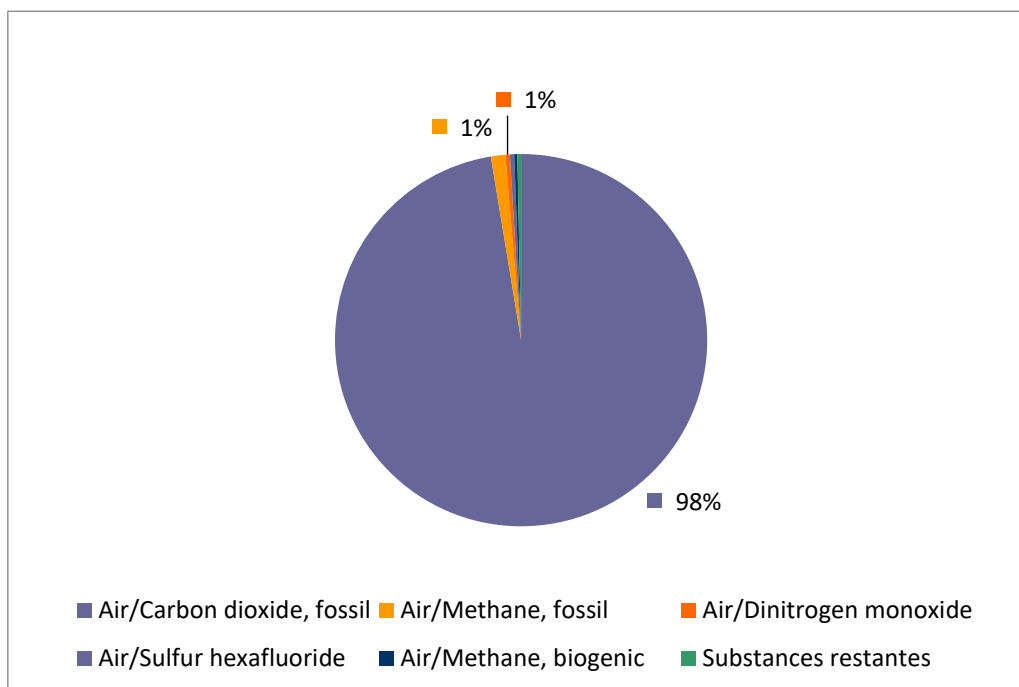


Figure 18: Camembert représentant les émissions de réchauffement global lors du démantèlement

Utilisation d'énergie non renouvelable

Contrairement au réchauffement global, le procédé électromécanique possède un impact de 1,7 fois inférieur au conditionnement (2,7kPt et 1,6kPt respectivement). Dans l'étude de cet impact (et les autres impacts), le procédé de traitement du béton est encore négligé, pour les mêmes raisons.

Lors du découpage des métaux, 63,8% des impacts liés à l'utilisation d'énergie non renouvelable sont la cause de la production de l'acétylène utilisée comme produit et 33,7% pour l'usage de l'électricité. Il s'agit du mix énergétique français qui comprend : 73% de nucléaire, 12% d'hydroélectrique et 6% de gaz naturels (Ecolnvent3). Pour le cas du

¹⁵CO₂ eq : unité basée sur le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) de différents gaz à effet de serre

conditionnement, la production de ciment à un impact de 81,3% pour cause de l'utilisation du charbon et du pétrole, et 12,3% pour l'utilisation des transports en camion.

L'utilisation d'énergies non renouvelable pour l'électricité peut être constatée. En effet, l'extraction de 19017 GJ primaires de l'uranium est nécessaire afin de produire de l'électricité (29% de l'extraction totale). L'extraction de 14411GJ primaires¹⁶ de pétrole brut (soit 22% de l'extraction totale), 14090GJ primaires de charbon dur (17%) ainsi que 11033GJ primaires de gaz naturel (10%) sont besoin pour l'étape de démantèlement.

Effets respiratoires (inorganiques)

La figure 17 nous montre que le procédé électromécanique (2,7 kPt) a un impact 1,7 fois plus faible que lors du conditionnement de déchets radioactifs (1,6kPt). Le traitement du béton est encore une fois négligé, dû à son faible impact.

La majorité des impacts liés à l'effet respiratoire inorganique est due à la production de l'acétylène à 85,7%, lors du découpage des métaux. Lors du conditionnement de déchets radioactifs, la production du ciment utilisé pour le mortier contribue à 86,2% des impacts, due à l'utilisation du diesel pour la production du ciment et du charbon. Quant au transport, il contribue à 8,7% de l'impact sur les effets respiratoires inorganiques.

Le processus de démantèlement émet 19800 kg PM2.5eq¹⁷ de particules de taille fine « < 2.5 µm » (soit 45% des émissions totales), ainsi que 15500kg PM2.5eq d'oxyde d'azote (36%), 7890kg PM2.5 eq de dioxyde de soufre (18%) et enfin, 229kg PM2.5 eq ammoniac (1%).

Écotoxicité terrestre

Les impacts calculés en "point", pour la catégorie d'impact "écotoxicité terrestre", sont relativement faibles, comparés aux trois catégories précédentes. De 2 à 15 fois plus faibles. La phase électromécanique (0,2kPt) est 4 fois plus faible que la phase de conditionnement. L'impact sur le béton est de l'ordre du millième kPt, et donc négligé.

Pour le cas du découpage des métaux durant le processus électromécanique, 84% de l'impact sur l'écotoxicité terrestre, est dû à la production de l'acétylène à 84%. Durant le conditionnement des déchets radioactifs, 81,3% des impacts sont générés par la production du ciment et par l'utilisation des processus de transport à hauteur de 12,3%.

Les substances d'aluminium au sol sont responsables d'une émission à hauteur de 834631 t de Triethylene glycol dans le sol (TEG soil) (soit 48% des émissions totales), ainsi que 326632 t TEG soil de substance de Zinc au sol (19%). Nous retrouvons l'aluminium dans l'air avec une quantité de 296821 t TEG soil en total (17%).

¹⁶ MJ primaire : Niveau d'intensité énergétique de l'énergie primaire

¹⁷ PM2.5 : quantité de matière dont la taille est inférieure à 2.5µm

2. Assainissement

L'assainissement se décompose en découpage des métaux, la décontamination, le conditionnement des déchets radioactifs. (cf . Figure 19)

Le conditionnement des déchets contribue majoritairement à l'écotoxicité terrestre et au réchauffement global. Le découpage des métaux est le plus fort contributeur aux effets respiratoires liés aux composés inorganiques et de la consommation d'énergie non renouvelable.

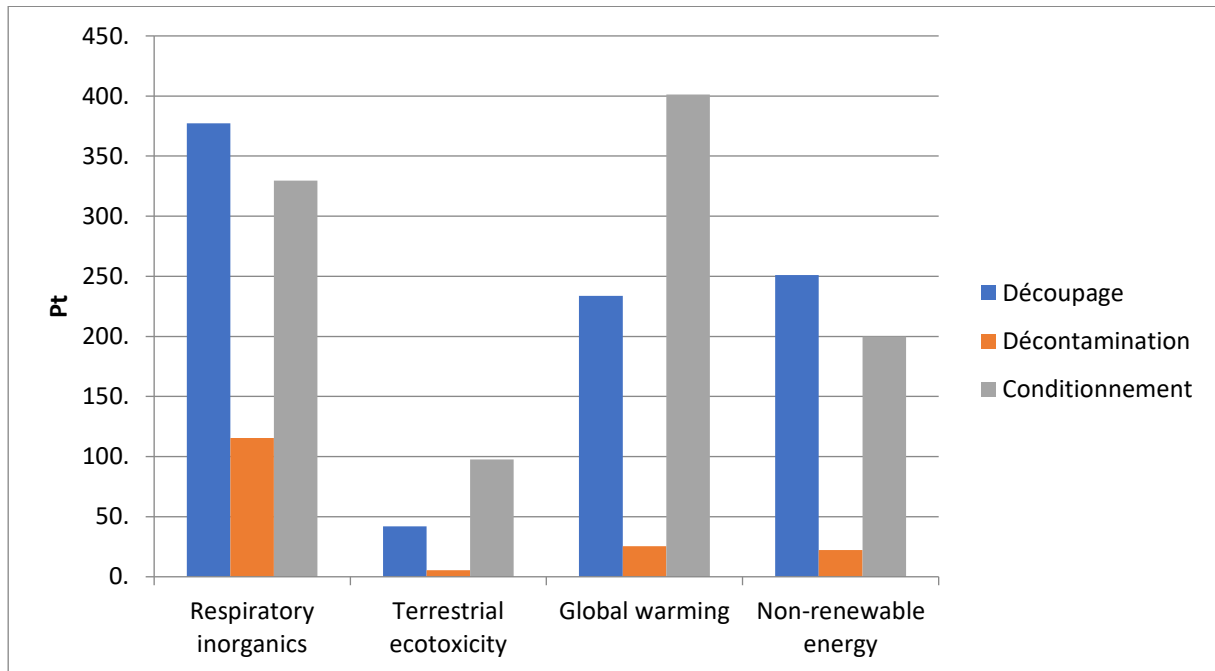


Figure 19 Comparaison des impacts du process d'assainissement

Réchauffement global

L'impact le plus important sur le réchauffement climatique est le conditionnement de déchets radioactifs à 401.2 Pt. En effet, l'impact est 1.8 fois supérieur à celui du découpage qui est à 223.7 Pt. La décontamination représente quant à lui un niveau d'impact de 25.5 Pt.

Durant la décontamination, la production de l'acide oxalique, utilisée comme produit d'assainissement des structures, provoque 84.4% des impacts de réchauffement global. En effet, durant la production de cet l'acide oxalique, l'acide nitrique (23.1%), le propylène (7.03%), l'hydroxyde de sodium (7.69%) sont utilisés.

Pour ce qui est découpage et conditionnement, les ratios d'impacts sont les mêmes que pour la phase de démantèlement [Assainissement]. Ils ne vont pas être traités dans cette section.

L'impact sur le réchauffement global est majoritairement représenté par l'émission de dioxyde de carbone à 82% de l'émission totale. L'émission se chiffre à 17410 t CO₂ eq de dioxyde de carbone. Le protoxyde d'azote génère 32089 t CO₂ eq d'émission (15%), ainsi que le méthane avec 6354t CO₂ eq, soit seulement 3% des émissions totales.

Utilisation d'énergies non renouvelables

Le découpage des métaux a un impact sur l'utilisation d'énergie non renouvelable à hauteur de 251.1 Pt. Par ailleurs, le conditionnement contribue à hauteur de 199.9 Pt et présente une valeur inférieure de 10 fois pour la décontamination (22.3Pt).

Lors de la décontamination, la production de propylène représente 41.3% des impacts liés à l'utilisation des énergies non renouvelables, l'utilisation du charbon à 10.1% l'utilisation de l'électricité 7.69% et 9.95% pour la production d'acide phosphorique.

Les quatre substances principales qui ont un impact sur l'utilisation d'énergies non renouvelables sont : le charbon dur avec 24 TJ primaires (34% de l'extraction totale), le pétrole brut avec 18 TJ primaires (26%), le gaz naturel 13 TJ primaires (19%) et l'uranium avec 10.2 TJ (14%). (Cf Figure 20)

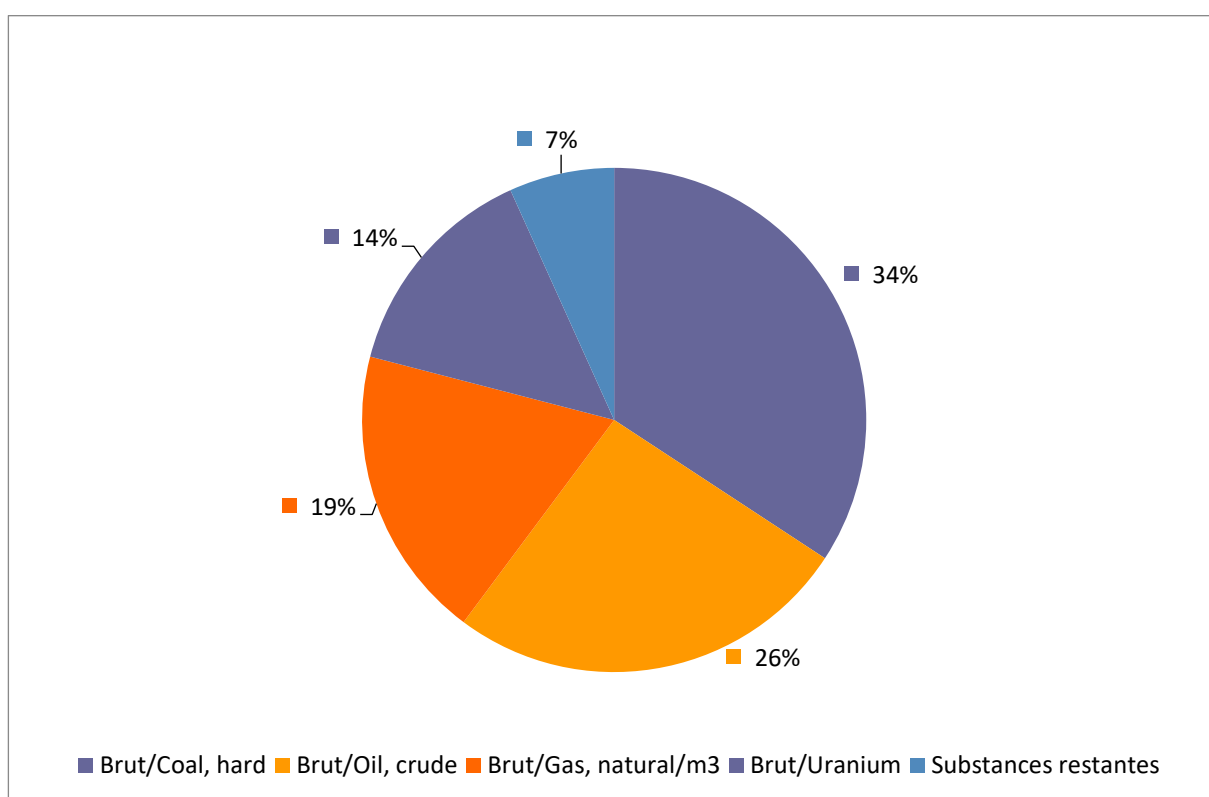


Figure 20 : Camembert représentant les impacts d'utilisation de ressources renouvelable lors de l'assainissement

Effets respiratoires (inorganiques)

Le découpage engendre un impact important de 377.4 Pt. Le conditionnement de déchets radioactifs provoque un impact de 329.6 Pt. Durant l'assainissement, le traitement de décontamination génère l'impact le plus faible de 115.6 Pt.

La production de l'acide oxalique à hauteur de 92.5% est majoritairement responsable des effets respiratoires inorganiques lors de la décontamination. Cette production est composée d'utilisation d'acide nitrique (3.27%), de l'hydroxyde de sodium (2.94%), et d'acide sulfurique.

Le processus de démantèlement émet 19800 kg PM2.5eq de particules de taille fines « < 2.5 » µm (soit 45% des émissions totales), ainsi que 15500kg PM2.5eq d'oxyde d'azote (36%), 7890kg PM2.5 eq de dioxyde de soufre (18%) et enfin, 229kg PM2.5 eq ammoniac (1%).

Le monoxyde d'azote est responsable à hauteur 814 t PM2.5eq d'émissions dans l'air (75% d'émission totale) durant l'assainissement. Ils proviennent de la production d'acétylène et de la production du mortier pour le conditionnement. Le dioxyde de soufre et les particules de taille fine « < 2.5 µm » provoquent respectivement 114 t PM2.5eq ainsi que 105 t PM2.5eq de démissions (11% et 9%). L'oxyde d'azote émet 48 t PM.5eq dans l'air, soit 9%.

Écotoxicité terrestre

À la différence des effets respiratoires organiques, le conditionnement émet l'émission la plus importante pour l'écotoxicité terrestre (97.7 Pt). Le découpage a un impact 2.3 fois plus faible que le conditionnement de déchets radioactifs (42 Pt). Quant à la décontamination, elle a un impact de 5.4 Pt, malgré le fait que ce traitement soit considéré comme primordial lors du démantèlement du CNPE.

La production de l'acide oxalique a l'impact le plus élevé avec une part de 64.8% au niveau des impacts durant la décontamination. Le processus de production d'acide oxalique est constitué de la production de la chaleur avec des gaz naturels (25.1%), production du granulat d'acier (3.96%) ainsi que la production de l'acide phosphorique (25.5%)

Le transfert de l'aluminium dans le sol et dans l'air est responsable de 55% (139 kton t TEG soil) et 16% (39.4 kton t TEG soil) de l'émission totale, soit un total de 71%. Les 29% restant sont un mélange de zinc et de cuivre dans le sol et l'air. (Cf Figure 21) :

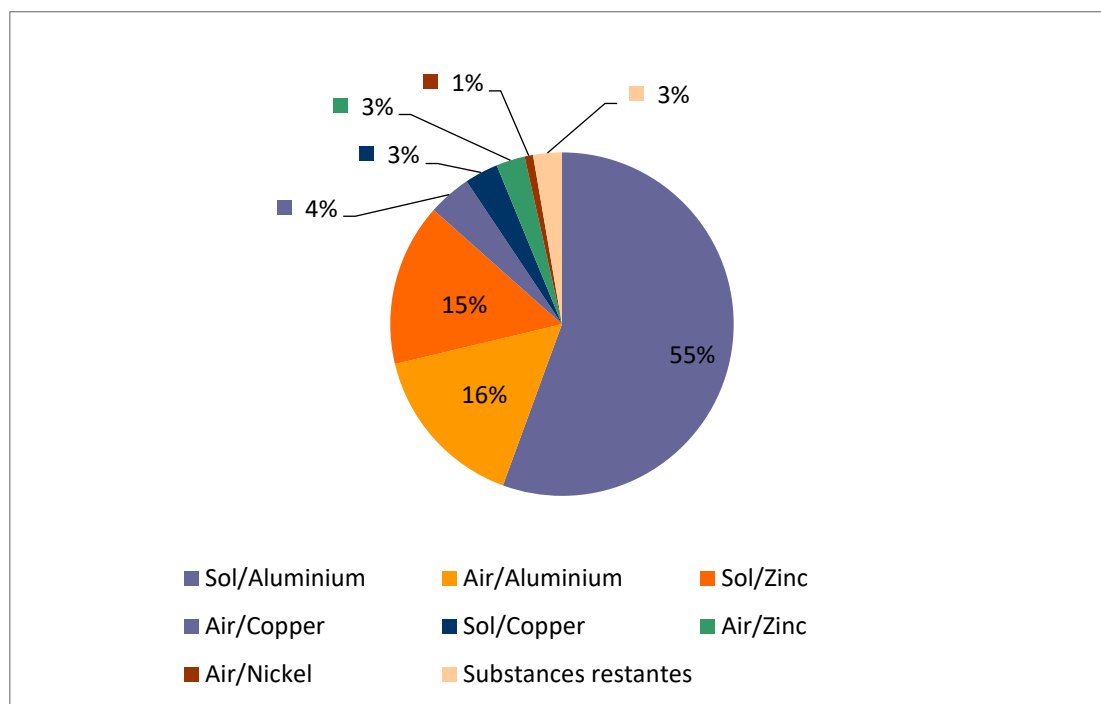


Figure 21 : Camembert représentant les impacts sur l'écotoxicité terrestre de l'assainissement

3. Démolition

La démolition se décompose en découpage des métaux, et des travaux de démolitions. (cf . Figure 22). Le découpage du métal est le contributeur dominant des quatre catégories d'impact considérées.

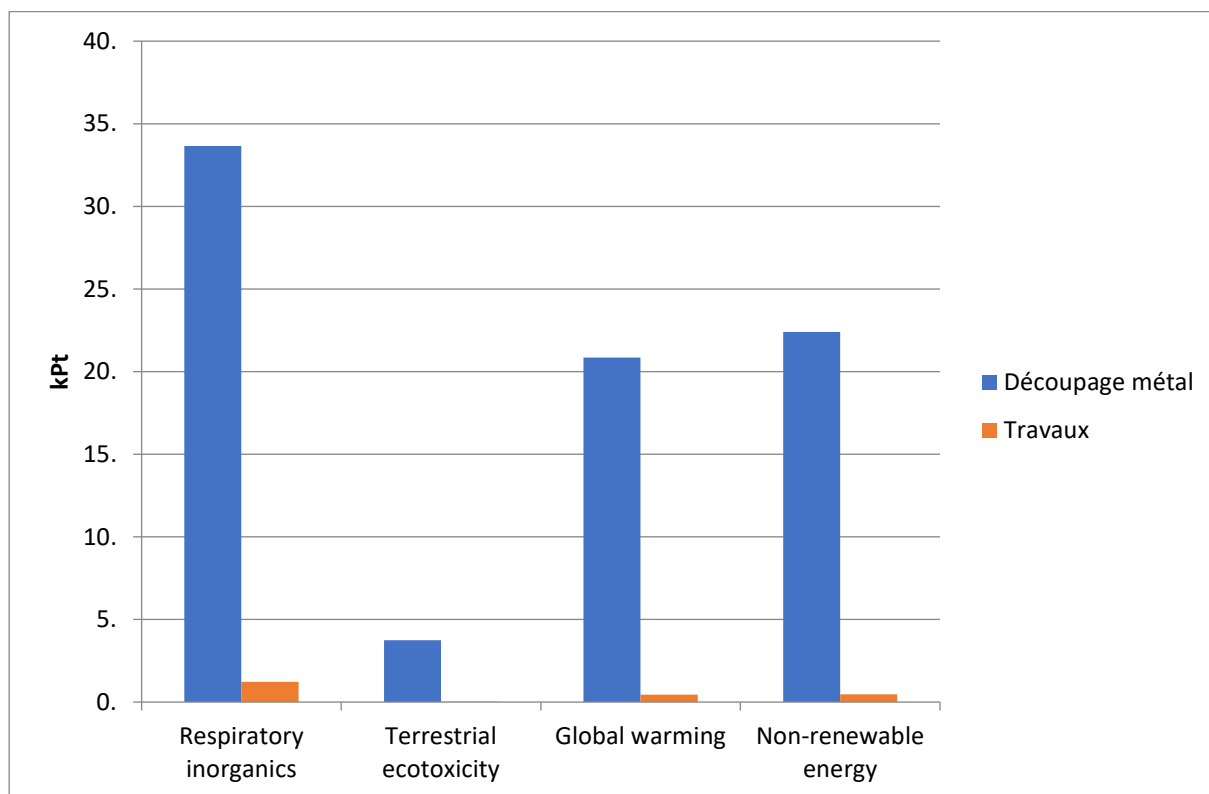


Figure 22 : Comparaison des impacts du processus de démolition

Réchauffement global

La grande majorité des impacts est générée par le processus de découpage de métal (20.9 kPt). Cependant, les travaux de démolition ont un impact très faible en contraste à celle du découpage de métal avec 0.46 kPt.

Durant le process de travaux de démolition, la combustion de diesel représente la grande majorité des impacts sur le réchauffement climatique avec une proportion de 99.3% des impacts totale. L'autre source d'impact sur le réchauffement global est l'utilisation de l'électricité, mais qui est très faible à 0.653%.

Pour ce qui est découpage du métal, les ratios d'impacts sont identiques à la phase de démantèlement. Ils ne vont donc pas être discutés dans cette section.

Le processus de démolition dans l'ensemble émet 201 kton CO₂ eq de dioxyde de carbone dans l'air, soit une quantité de 96% de l'émission totale. Le méthane génère un total de 5705 t CO₂ eq avec une émission totale de 3%.

Utilisation d'énergies non renouvelables

Comme pour le réchauffement global, le processus de découpage des métaux à l'impact le plus important avec 22.4 kPt due à l'utilisation de l'acétylène. Quant aux travaux de démolition, elle a un impact plus faible avec un impact de 0.47 kPt.

La combustion de diesel modélisée lors du processus des travaux a un ratio important sur l'impact total de l'utilisation d'énergies non renouvelables. En effet, elles représentent 93.2% de l'impact total lors des travaux de démantèlement. L'utilisation de l'électricité représente, quant à elle, 6.78% de l'impact total.

L'utilisation de l'uranium comme d'énergies non renouvelables pour produire de l'électricité s'agit du mix énergétique français. En effet, il conduit à un impact de 764 TJ primaires (22%) utilisés. Pour le charbon dur et le gaz naturel, ils nécessitent 1261 TJ primaires (36%) et 792 TJ primaires (23%) respectivement.

Effets respiratoires (inorganiques)

Le découpage métal représente une fois de plus le processus ayant le plus fort impact sur les effets respiratoires liés aux composés inorganiques avec une valeur de 33.7 kPt. Elle est due à la production d'acétylène. Les travaux de démolition ont un impact plus faible au découpage avec une valeur de 1.2kPt.

Durant la phase de démolition, les particules fines « < 2.5 µm » provoquent une émission de 238 t PM.5 eq, soit une part de 68% des émissions vers l'air. L'oxyde d'azote contribue de 68 t PM2.5 eq avec 19% d'émission. Pour finir, le dioxyde de soufre à un impact de 46t PM2.5 eq .(Cf. Figure 23)

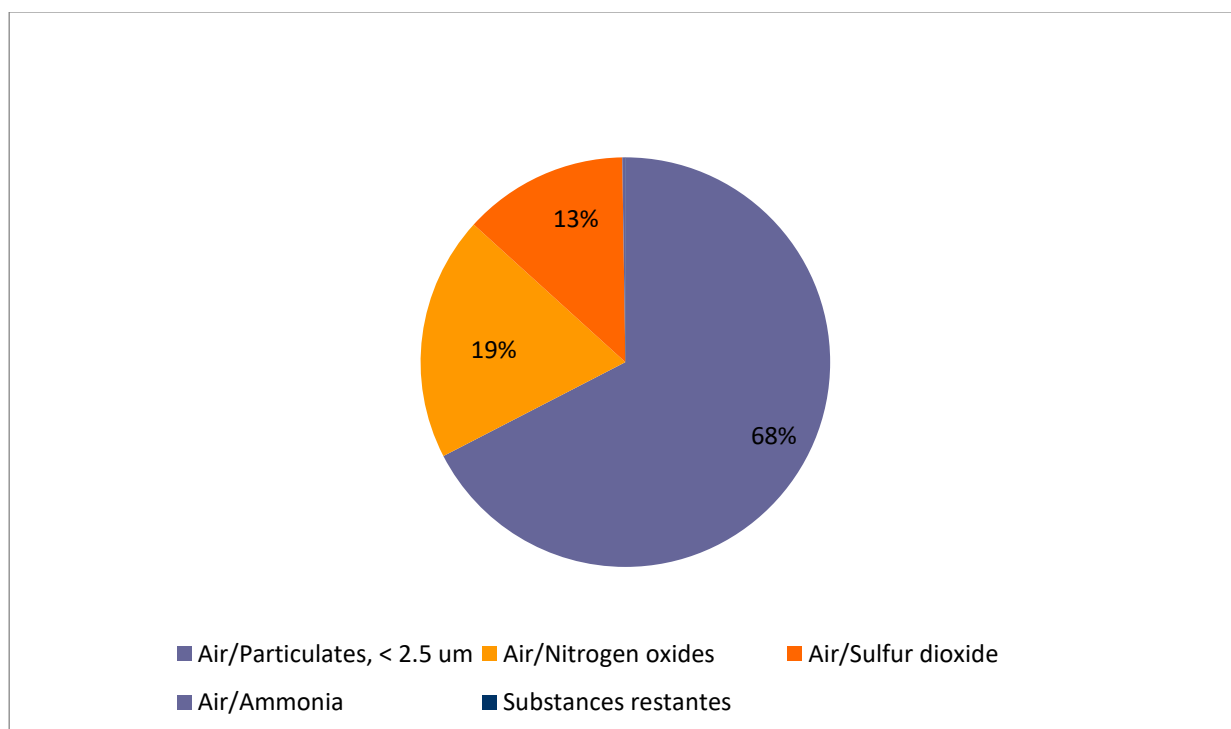


Figure 23 : Camembert représentant les impacts des Effets respiratoires (inorganiques) lors de la démolition

Écotoxicité terrestre

Le plus conséquent des impacts sur l'écotoxicité terrestre est le processus de découpage des métaux à 3.7 kPt. En effet, due à la production de l'acétylène, l'impact est 123 fois supérieur à celui des travaux de démolition (0.03 kPt).

La combustion de diesel dans les machines de déconstruction a l'impact le plus important avec une répartition de 96.8% des impacts durant les travaux de démolition. L'utilisation de l'électricité contribue à une hauteur de 3.17% sur les impacts totaux de l'écotoxicité terrestre.

Pour cette catégorie d'impact, la substance dont son émission est importante est : l'aluminium. Il est responsable à 62% sur le sol (4064 kton TEG soil) et 19% (1216 kton TEG soil) dans l'air. Les 19% restant sont composés de démissions de zinc, de cuivre et du chrome.

4. Transport :

Les déchets conventionnels représentent 95% des déchets issus du démantèlement. Cependant, la comparaison dans la *figure 24* peut témoigner que l'impact du transport des déchets radioactifs est de 3.2 à 6.1 fois plus important que celui du transport de déchets conventionnels. Cependant, il est constaté que le produit de la distance de transport sur route et de la masse des déchets radioactifs sont supérieures à 4.1x à celles des déchets conventionnels. La raison pour cela est la distance de transport (CIRES 317km du CNPE) (CSA ;314km) (ICEDA ; 395km), vers les centres de traitements et le conditionnement imposé par l'ANDRA (2018).

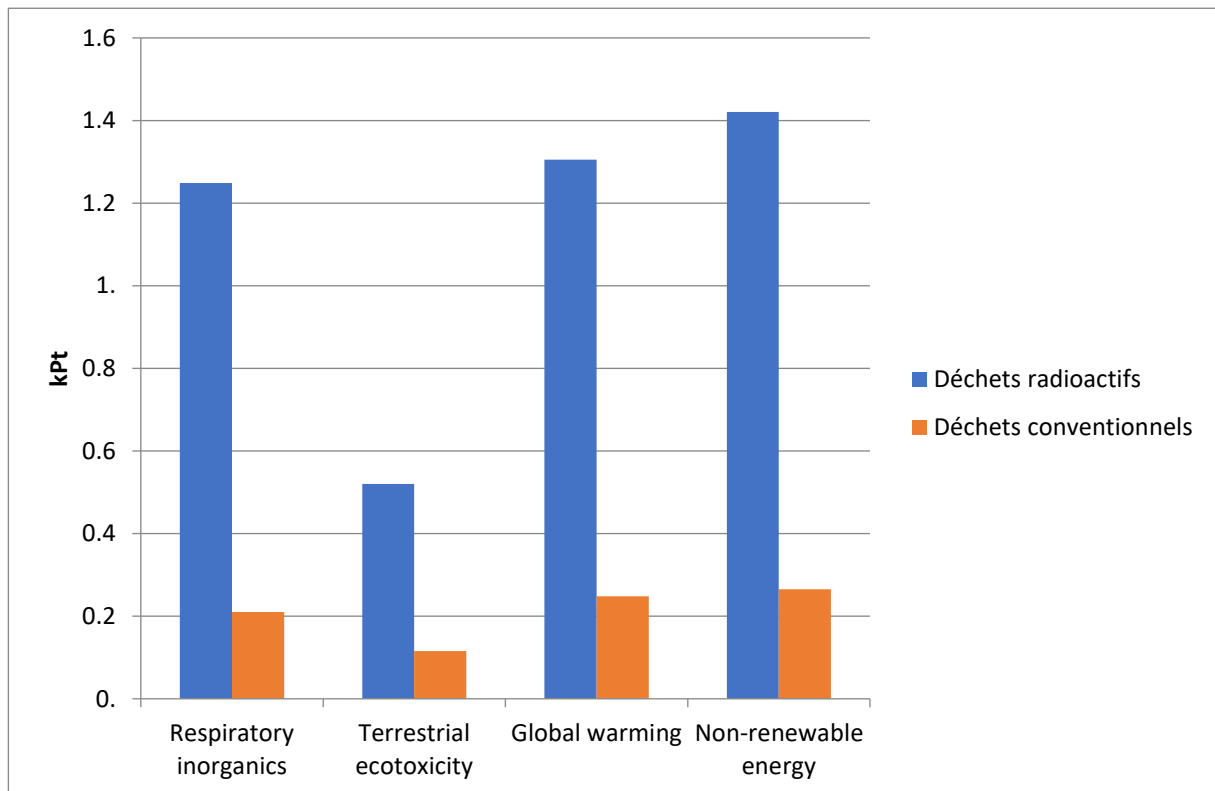


Figure 24 : Comparaison de Transport de déchets

4. Comparaison avec les autres études :

Cette étude peut être comparable à deux études qui existent dans le monde (Seier *et al* 2014) (Wallbridge *et al.* 2012). En effet, Seier (2014) utilise une mise à échelle des résultats d'émissions de CO₂ eq totales avec la quantité de déchets totale produite par cette CNPE. Il argumente que la quantité de CO₂ émise lors du démantèlement est proche de la valeur de la masse de déchets produite:

$$CNPE\ Magnox^{18} = \frac{t\ CO2eq\ KTF}{t\ déchets} = \frac{241000\ t\ CO2eq}{203500\ t\ déchet} = 1.18$$

$$CNPE\ Lubmin^{19} = \frac{t\ CO2eq\ KGR}{t\ déchets} = \frac{1651265\ t\ CO2eq}{2000000\ t\ déchet} = 0.8$$

Seier (2014) constate que le résultat de cette division varie autour de 1. L'utilisation de cette théorie avec les données du CNPE de Fessenheim donne ceci :

$$CNPE\ Fessenheim = \frac{t\ CO2eq\ INB75}{t\ déchets} = \frac{282000\ t\ CO2eq}{405000\ t\ déchet} = 0.7$$

Grâce à ce calcul, il est possible de dire que les résultats de cette étude ci sont dans l'ordre de grandeur des résultats attendues.

¹⁸ CNPE Magnox en Grand Bretagne

¹⁹ CNPE Lubmin en Allemagne

Conclusion

Avec la présence de plusieurs centaines de CNPE dans le monde, les connaissances et les retours d'expérience liés au démantèlement des CNPE sont en forte demande. En effet, en France uniquement, EDF annonce que le démantèlement 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035 (dont le CNPE Fessenheim). Toutefois, il existe peu d'études sur les impacts environnementaux qu'engendre un démantèlement. L'étape de « fin de vie » d'un site nucléaire est règlementée par l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire) pour l'assainissement, ainsi que par l'ANDRA pour la gestion de déchets radioactifs. En effet, le procédé de démantèlement d'un site nucléaire diffère totalement d'une démolition d'un bâtiment conventionnel. Des opérations de décontamination et de gestion des déchets radioactifs sont nécessaires afin d'éliminer la présence de radionucléides et de convertir le territoire de Fessenheim en un « site non-Nucléaire ». Du fait de la complexité des opérations et de leur durée, la fin de vie d'un CNPE soulève plusieurs questions d'ordre environnemental et socio-économique.

Afin d'évaluer les impacts environnementaux du démantèlement du CNPE de Fessenheim, une analyse du cycle de vie prospective a été établie. Pour pallier le manque de données sur le procédé de démantèlement, cette ACV a été réalisée à partir de données issues de la littérature, d'une base de données d'ACV (Ecoinvent3) et de logiciels de cartographie (Open Street Map, Open Railway Map).

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude :

- Le processus de fin de vie de la CNPE émet 282000 t CO₂ eq qui contribue fortement au réchauffement climatique. La démolition est responsable à 75% de cet impact. Cette émission est générée par le traitement de métal par découpage.
- Concernant l'impact de l'utilisation d'énergies renouvelable, le démantèlement utilise 4460 TJ d'énergie avec une part de 22% d'uranium. Il est déduit que cela provient du mixte énergétique français.
- Le plus grand impact en termes de « points » sur la catégorie « effet respiratoire inorganique » s'observe lors du démantèlement du CNPE de Fessenheim avec 41.5 kPt, soit 420 t PM2.5 eq. La démolition contribue essentiellement à cet impact dû au découpage des métaux avec 84.13% des parts sur l'émission.
- L'impact majoritaire de la démolition contribue à 67.9% dans la catégorie écotoxicité. En effet, avec 963000 t de Triethylene glycol (TEG) sur le sol (soil) en total, la démolition représente, à elle seule, 654000 t TEG soil de substances émises.

Il a été constaté que le processus de démolition a le plus grand impact sur toutes les catégories étudiées. En effet, avec l'utilisation de l'acétylène lors de du découpage des métaux, la démolition représente au minimum 67.9% des impacts.

Il est possible de se pencher sur l'étude du recyclage des matériaux tels que le béton ainsi que sur les métaux issus de la démolition. A l'aide de cette étude, il sera possible de savoir si le recyclage permet de conduire à la réduction des impacts environnementaux, grâce à une revalorisation sur le long terme.

La question sur la politique du seuil de libération des déchets radioactifs peut être remise en question. En France, tout déchets étant en contact avec un environnement radioactif sont classifiés comme déchets radioactifs, quel que soit son taux de radioactivité. Dans d'autres pays, comme la Suède, il y a un seuil de libération des déchets radioactifs qui permet de déclassifier des déchets TFA en déchets conventionnel. Lors du démantèlement du CNPE de Fessenheim, les déchets très faiblement radioactifs représentent 60% de la masse totale des déchets radioactifs. Leur transport contribue exponentiellement plus par tonnes que le transport de déchets conventionnels. Une politique du seuil de libération des déchets radioactifs en déchets conventionnels pourrait limiter l'impact environnemental durant le cycle de vie de la CNPE.

D. Apport du stage à l'étudiant et l'organisation du stage

Apport du stage

Ce stage m'a permis de découvrir le domaine de la recherche scientifique et aussi le domaine de l'écoconception. J'ai pu redécouvrir et mettre en œuvre l'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14040 et ISO 14044). Cet outil avait été mentionné en cours comme une méthode pour modéliser des impacts environnementaux. Cependant, nous n'avons jamais eu l'opportunité d'étudier cela en profondeur. L'utilisation de l'ACV est très répandue dans le domaine de l'écoconception et je suis convaincu que je l'utiliserai pour ma future thèse et mon futur emploi.

Durant ce stage, j'ai pu acquérir et travaillé plusieurs compétences qui sont indispensables lors d'une thèse. Premièrement, j'ai pu travailler ma recherche bibliographique : une grande partie de ce stage était la lecture de documents et de publications. La partie bibliographique de la recherche est un exercice qui nécessite de l'organisation et de la concentration. Cette partie de la recherche est très importante, puisque elle permet de s'approprier son propre sujet et connaître l'avancement de la recherche sur le sujet.

Deuxièmement, j'ai pu travailler ma capacité de synthèse et de rédaction scientifique : cet exercice nécessite une capacité de rédaction claire et simple, tout en respectant la propriété intellectuelle (en citant) et en étant précis dans les déclarations.

Troisièmement, l'utilisation d'un logiciel nouveau « SIMAPRO » : j'ai pu découvrir et utiliser un nouveau type de logiciel qui est nouveau pour moi. En effet, ce type de logiciel est différent des logiciels que j'ai utilisés au cours de ma formation (comme la conception assistée par ordinateur). Il a fallu donc sortir de ma zone de confort et apprendre une nouvelle façon de utiliser un logiciel pour un ingénieur.

Dernièrement, la maîtrise de soi et le savoir être en laboratoire : ayant eu l'opportunité de travailler au sein de l'équipe de radiochimie, il était très important de parler et échanger avec ma tutrice et mes collègues de travail.

Ce stage m'a permis de sortir de ma zone de confort et de découvrir un nouveau domaine qui est la modélisation des impacts environnementaux par analyse du cycle de vie. Il a réussi à me faire prendre conscience des risques environnementaux et socio-économiques que peut engendrer un démantèlement de CNPE.

Organisation du Stage

Le stage s'est divisé en quatre grande parties : la bibliographie, la définition des objectifs, la construction de l'inventaire et la modélisation des impacts. (Cf. Figure 25) :

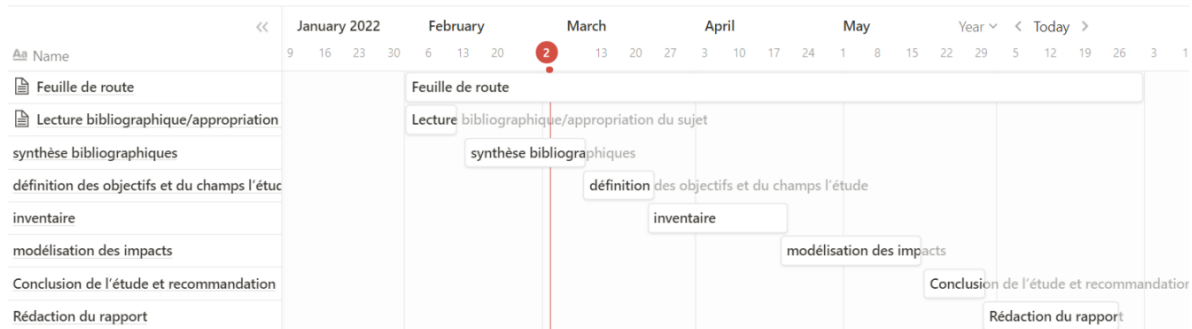


Figure 25 : diagramme de GANTT pour l'organisation du stage

Après chaque partie, j'avais un RDV avec ma tutrice afin de définir les prochains objectifs et de discuter de mon travail fait lors de la partie précédente.

La feuille de route m'a permis de garder une trace sur le travail que j'ai fait. J'ai utilisé le logiciel « notion.so » afin de noter ce que j'ai fait lors de mes journées. Il m'a permis de aussi faire un petit rapport chaque semaine et décrire les différents problèmes rencontrés lors de mon travail sur mon sujet

Bibliographie

- Annseta, S. (1998). *Estimating life cycle greenhouse gas emissions from CANDU nuclear power plants*. <http://www.computare.org/Support%20documents/Publications/Life%20Cycle.htm>
- Barnaby, F., Kemp, J., & Oxford Research Group. (2007). *Secure energy? : Civil nuclear power, security and global warming*. Oxford Research Group.
- Beerten, J., Laes, E., Meskens, G., & D'haeseleer, W. (2009). Greenhouse gas emissions in the nuclear life cycle : A balanced appraisal. *Energy Policy*, 37(12), 5056-5068. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.073>
- Bond, A., Bussell, M., O'Sullivan, P., & Palerm, J. (2003). Environmental impact assessment and the decommissioning of nuclear power plants—A review and suggestion for a best practicable approach. *Environmental Impact Assessment Review*, 23(2), 197-217. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(02\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(02)00091-4)
- Carless, T. S., Griffin, W. M., & Fischbeck, P. S. (2016). The environmental competitiveness of small modular reactors : A life cycle study. *Energy*, 114, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.111>
- Cluzel, F., Leroy, Y., & Yannou, B. (2013). Toward a structured functional unit definition framework to limit LCA results variability. *6th International Conference on Life Cycle Management - LCM 2013*, Paper no. 484. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00850562>
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Éd.). (2018). *L'assainissement-démantèlement des installations nucléaires*. Éditions « Le Moniteur » CEA.
- DatabaseManualMethods.pdf*. (s. d.). Consulté 7 février 2022, à l'adresse <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/06/DatabaseManualMethods.pdf>
- Data.pdf*. (s. d.). Consulté 10 février 2022, à l'adresse <https://portal.environdec.com/api/api/v1/EPDLibrary/Files/e59da2bc-e8ce-4992-b341-7f52f7d87608/Data>
- Dem_fessenheim_p3.pdf*. (s. d.). Consulté 7 février 2022, à l'adresse https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/nucleaire/Notes%20d%27information/dem_fessenheim_p3.pdf
- Dossier03_in2018.pdf*. (s. d.). Consulté 10 février 2022, à l'adresse https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/dossier03_in2018.pdf
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment : Detailed guidance*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>
- Fthenakis, V. M., & Kim, H. C. (2007). Greenhouse-gas emissions from solar electric- and nuclear power : A life-cycle study. *Energy Policy*, 35(4), 2549-2557. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.06.022>
- Gibon, T., Hertwich, E. G., Arvesen, A., Singh, B., & Veronesi, F. (2017). Health benefits, ecological threats of low-carbon electricity. *Environmental Research Letters*, 12(3), 034023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6047>
- Guide relatif à l'assainissement des structures dans les installations nucléaires de base (s. d.). ASN Consulté 7 février 2022, à l'adresse https://www.cea.fr/entreprises/Documents/guide-ASN_14_assainissement.pdf
- Hondo, H. (2005). Life cycle GHG emission analysis of power generation systems : Japanese case. *Energy*, 30(11), 2042-2056. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.07.020>
- IEA. (s. d.). *Data overview*. IEA. Consulté 18 février 2022, à l'adresse <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- International Atomic Energy Agency. (2002). *Safe and effective nuclear power plant life cycle management towards decommissioning*.
- ISA_Nuclear_Report.pdf*. (s. d.). Consulté 22 février 2022, à l'adresse https://isa.org.usyd.edu.au/publications/documents/ISA_Nuclear_Report.pdf
- NF EN ISO14040*. (s. d.). Consulté 7 février 2022, à l'adresse <https://viewerbdc.afnor.org/pdf/viewer/NU9I0fiAEbM1>
- NF EN ISO14044*. (s. d.). Consulté 7 février 2022, à l'adresse <https://viewerbdc.afnor.org/pdf/viewer/CsfztOajzHM1>
- Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., & Crettaz, P. (s. d.). *Environmental Life Cycle Assessment*. 330.
- Kadiyala, A., Kommalapati, R., & Huque, Z. (2016). Quantification of the Lifecycle Greenhouse Gas Emissions from Nuclear Power Generation Systems. *Energies*, 9, 863. <https://doi.org/10.3390/en9110863>

- Kim, J. H., Hornibrook, C., & Yim, M.-S. (2020). The impact of below detection limit samples in residual risk assessments for decommissioning nuclear power plant sites. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 106340. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106340>
- Koltun, P., Tsykalo, A., & Novozhilov, V. (2018). Life Cycle Assessment of the New Generation GT-MHR Nuclear Power Plant. *Energies*, 11(12), 3452. <https://doi.org/10.3390/en11123452>
- Laraia, M. (2021). The concept of sustainability as applicable to nuclear decommissioning. In *Nuclear Decommissioning Case Studies* (p. 3-7). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85734-5.00002-1>
- Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy : A review. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2178-2199. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.033>
- European Commission (2011) Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions Consulté 23 février 2022, à l'adresse <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0885:FIN:EN:PDF>
- Li, Q., Duan, H., Xie, M., Kang, P., Ma, Y., Zhong, R., Gao, T., Zhong, W., Wen, B., Bai, F., & Vuppaladadiyam, A. K. (2021). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110499>
- Life cycle sustainability assessment of UK electricity scenarios to 2070—ScienceDirect.* (s. d.). Consulté 23 février 2022, à l'adresse <https://www.sciencedirect-com.scd-rproxy.u-strasbg.fr/science/article/pii/S0973082614000957>
- M40wastemanagement20190912F.pdf.* (s. d.). Consulté 23 février 2022, à l'adresse <http://www.stormsmith.nl/Resources/m40wastemanagement20190912F.pdf>
- Nuclear Decommissioning : Decommission nuclear facilities—World Nuclear Association.* (s. d.). Consulté 10 février 2022, à l'adresse <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx>
- Paulillo, A. (2018). Operationalising the use of Life Cycle Assessment to nuclear waste management [Doctoral, UCL (University College London)]. In *Doctoral thesis, UCL (University College London)*. UCL (University College London). <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10059990/>
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939-945. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Poinssot, Ch., Bourg, S., & Boullis, B. (2016). Improving the nuclear energy sustainability by decreasing its environmental footprint. Guidelines from life cycle assessment simulations. *Progress in Nuclear Energy*, 92, 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.10.012>
- Poinssot, Ch., Bourg, S., Ouvrier, N., Combernoux, N., Rostaing, C., Vargas-Gonzalez, M., & Bruno, J. (2014). Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles. *Energy*, 69, 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.069>
- Pomponi, F., & Hart, J. (2021). The greenhouse gas emissions of nuclear energy – Life cycle assessment of a European pressurised reactor. *Applied Energy*, 290, 116743. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116743>
- Riekstina, D., Berzins, J., Krasta, T., Kizane, G., & Rudzitis, J. (2016). Impact of the Former Salaspils Nuclear Reactor on the Surrounding Territory. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 53. <https://doi.org/10.1515/lpts-2016-0022>
- Seier, M., & Zimmermann, T. (2014). Environmental impacts of decommissioning nuclear power plants : Methodical challenges, case study, and implications. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12), 1919-1932. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0794-2>
- Šerešová, M., Štefanica, J., Vitvarová, M., Zakuciová, K., Wolf, P., & Kočí, V. (2020). Life Cycle Performance of Various Energy Sources Used in the Czech Republic. *Energies*, 13(21), 5833. <https://doi.org/10.3390/en13215833>
- Sovacool, B. K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power : A critical survey. *Energy Policy*, 36(8), 2950-2963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
- The-product-functional-unit-and-reference-flows-in-LCA.pdf.* (s. d.). Consulté 9 février 2022, à l'adresse <https://lca-center.dk/wp-content/uploads/2015/08/The-product-functional-unit-and-reference-flows-in-LCA.pdf>
- Tokimatsu, K., Kosugi, T., Asami, T., Williams, E., & Kaya, Y. (2006). Evaluation of lifecycle CO2 emissions from the Japanese electric power sector in the 21st century under various nuclear scenarios. *Energy Policy*, 34(7), 833-852. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.08.011>

- Voorspools, K. R., Brouwers, E. A., & D'haeseleer, W. D. (2000). Energy content and indirect greenhouse gas emissions embedded in 'emission-free' power plants: Results for the Low Countries. *Applied Energy*, 67(3), 307-330. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(00\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00016-7)
- Wallbridge, S., Banford, A., & Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of decommissioning Magnox nuclear power plants in the UK. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 990-1008. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0534-4>
- Wang, L., Wang, Y., Du, H., Zuo, J., Yi Man Li, R., Zhou, Z., Bi, F., & Garvlehn, M. P. (2019). A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study. *Applied Energy*, 249, 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.099>
- Wang, L., Wang, Y., Zhou, Z., Garvlehn, M. P., & Bi, F. (2018). Comparative Assessment of the Environmental Impacts of Hydro-Electric, Nuclear and Wind Power Plants in China: Life Cycle Considerations. *Energy Procedia*, 152, 1009-1014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.108>
- Warner, E. S., & Heath, G. A. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Electricity Generation. *Journal of Industrial Ecology*, 16(s1), S73-S92. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00472.x>
- White, S. W., & Kulcinski, G. L. (2000). Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants. *Fusion Engineering and Design*, 48(3), 473-481. [https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(00\)00158-7](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00158-7)
- Zafrilla, J. E., Cadarso, M.-Á., Monsalve, F., & de la Rúa, C. (2014). How Carbon-Friendly Is Nuclear Energy? A Hybrid MRIO-LCA Model of a Spanish Facility. *Environmental Science & Technology*, 48(24), 14103-14111. <https://doi.org/10.1021/es503352s>

Annexe 1

Catégorie d'impact (mid-point)	Unité de référence (mid-point)	Catégorie de dommage (end-point)	Unité de dommage (end-point)
Toxicité humaine (cancérogène)	kg C2H3Cl eq	Santé humaine	DALY
Toxicité humaine (noncancérogène)	kg C2H3Cl eq	Santé humaine	DALY
Effets respiratoires (inorganiques)	kg PM2.5 eq	Santé humaine	DALY
Radiations ionisantes	Bq Carbon-14 eq	Santé humaine	DALY
Diminution de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	Santé humaine	DALY
Effets respiratoires (organiques)	kg éthylène eq	Santé humaine	DALY
Oxydation photochimique	kg éthylène eq	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Écotoxicité aquatique	kg Triéthylène glycol	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Écotoxicité terrestre	kg Triéthylène glycol	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Acidification terrestre	kg SO2 eq	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Acidification aquatique	kg SO2 eq	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Eutrophisation aquatique	kg PO4 3- eq	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Occupation du territoire	m ²	Qualité de l'écosystème	PDF.m2 .y
Réchauffement global	kg CO2 eq	Changement climatique	kg CO2 eq
Utilisation d'énergies non renouvelables	MJ	Ressources	MJ
Extraction	MJ	Ressources	MJ

Tableau 3 : Catégories d'impact de la méthode « IMPACT 2002+ »

Annexe 2

	Taille (Longueur, largeur hauteur) en m	aire 2d m ²	volume m ³	Surface du mur
salles machines	192	10560	475200	11115
	55			
	45			
BK	23	299	10465	1260
	13			
	35			
BW	50	2750	110000	8400
	55			
	40			
BAN	55	2530	101200	8080
	46			
	40			
BR	20 (rayon)	1256.637061	1000	8796.45943
	50			

Tableau 3 : Les cotes des bâtiments

Afin de mesurer la surface des bâtiments :

$$\text{Surface du mur (m}^2\text{)} = (\text{Longueur} + \text{Largeur}) * \text{hauteur}$$

$$\begin{aligned} \text{Surface du mur d'un bâtiment circulaire (m}^2\text{)} \\ = (2\pi(\text{rayon BR}) * \text{hauteur} + (\pi * (\text{rayon BR})^2) * 2 \end{aligned}$$

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

FACULTÉ DE PHYSIQUE ET INGÉNIERIE

MASTER Génie Industriel parcours Conception et Ergonomie

Auteur : Mehdi Iguidier

Titre : Analyse du cycle de vie (ACV) prospective du démantèlement du CNPE de Fessenheim

Promotion : MASTER 2 : Génie Industriel – Conception et Ergonomie (M2–GICE)

Structure d'accueil : Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien – CNRS

Département / pays : 67 Bas-Rhin / France

Code APE (NAF) : Recherche-développement en autres sciences physiques et naturelles (7219Z)

Résumé : Ce document représente le rapport de stage effectué à l'IPHC durant le second semestre de l'année scolaire 2021-2022 dans le cadre de la formation MASTER 2 : Génie Industriel : Conception et Ergonomie (M2 GICE). Le projet de « l'Analyse du cycle de vie (ACV) prospective du démantèlement du CNPE de Fessenheim » a pour but d'évaluer et d'effectuer une modélisation des impacts environnementaux lors de la phase de fin de vie du CNPE de Fessenheim. Cette modélisation a pour but d'aider à la décision politique en matière de gestion de déchets radioactifs et de gestion environnementale territoriale. Ce rapport décrit l'apport de l'étudiant dans ce projet grâce à une synthèse bibliographique, une analyse d'inventaire, une modélisation avec le logiciel « SIMAPRO » sur la base de données « ECOINVENT3 ». Ce rapport décrit aussi les connaissances et les capacités techniques assimilées lors du stage.

Mots clés : Stage de fin d'études ; Analyse du Cycle de Vie, IPHC, OHM Fessenheim, LABEX DRHIIM, Démantèlement, Études d'impact environnementales, SIMAPRO