



EDF
22-30, avenue de
Wagram
75382 Paris Cedex 08
552 081 317 R.C.S. Paris



ORANO
Tour AREVA
1, place Jean Millier
92084 Paris La Défense



CEA
Le Ponant D
25 rue Leblanc
75015 Paris

PNGMDR – Action POL.1

PNGMDR 2022- 2026 (Action POL.1)

-

**Evaluation environnementale
comparative de quatre cycles différents
du combustible électronucléaire pour
un parc EPR2 de 40 GWe
(cycle ouvert – cycle monorecyclage Pu
– monorecyclage Pu + URT,
multirecyclage Pu + URT)**

Réf. NT-DPS2D-2024/276

Sommaire

1. Introduction	8
2. Objectifs et périmètre de l'étude réalisée	8
2.1 Description du parc électronucléaire considéré dans l'étude	9
2.2 Description des quatre scénarios de cycle du combustible nucléaire étudiés	9
2.2.1 Cycle ouvert (sans retraitement du combustible usé UNE)	10
2.2.2 Cycle avec monorecyclage du plutonium (Pu)	10
2.2.3 Cycle avec monorecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)	11
2.2.4 Cycle avec multirecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)	12
2.3 Unité fonctionnelle	13
3. Principales hypothèses retenues sur l'ensemble du cycle du combustible	13
3.1 Synthèse des hypothèses structurantes	13
4. Résultats de l'étude pour le parc futur de 24 EPR2 et interprétations	16
4.1 Résultats des indicateurs de catégories d'impact pour les 3 cycles	16
4.2 Contribution des grandes phases du cycle de vie	18
4.3 Détail des impacts par étape du cycle	19
4.3.1 Construction des installations	19
4.3.2 Fonctionnement des installations	21
4.4 Principaux contributeurs au changement climatique	25
4.4.1 Contribution au changement climatique de la construction et du fonctionnement	25
4.5 Economie de ressources naturelles	28
5. Enseignements sur les déchets	28
6. Synthèse des résultats pour les QUATRE scénarios	31
7. ANNEXES	32
ANNEXE 1 : Présentation de l'outil modélisation	32
ANNEXE 2 : Niveaux de robustesse des indicateurs selon la méthode PEF [EU 2021, p 353]	33
ANNEXE 3 : Hypothèses retenues	35
1.1 FLUX DE MATIERE DE L'AMONT	35
1.1.1 Types de combustible et implantation des réacteurs EPR2	35
1.2 FLUX DE MATIERE DE L'AVANT	36
1.3 USINES CONSIDEREES	37
1.3.1 Mines	37
1.3.2 Autres usines du cycle	38
1.3.3 Energie produite par les réacteurs	38
1.3.4 Durée de vie des usines	38
1.4 MATERIAUX ET ENERGIES DE CONSTRUCTION	39

1.4.1	Energies de construction et consommation des matériaux	39
1.4.2	Nature du mix électrique	39
1.5	INVENTAIRE DES USINES EN PHASE D'EXPLOITATION	41
1.6	HYPOTHESES POUR LA MODELISATION DU CYCLE URT	65
1.6.1	Elaboration d'un plan spécifique	65
1.6.2	Estimation des volumes d'effluents du cycle URT	65
1.7	ÉMANATION DE RADON	71
1.7.1	Cas des mines	71
1.7.2	Cas de Malvési	73
1.8	REJETS CHIMIQUES DES MINES	73
1.8.1	Prise en compte des rejets chimiques et radioactifs liquides et radioactifs gazeux de l'année 2019 par type et zone géographique des réacteurs	73
1.8.2	Rejets liquides	73
1.8.3	Rejets de poussières atmosphériques	73
1.9	TRANSPORTS	74
1.9.1	Transport des matières nucléaires et déchets	74
1.9.2	Transport des matériaux de construction, déchets de démantèlement et réactifs	75
1.10	ENTREPOSAGES	75
1.10.1	Nombre de piscines d'entreposage des combustibles usés	75
1.10.2	Entreposages d'uranium appauvri et de retraitement	76
1.11	STOCKAGE DES DECHETS	78
1.12	DECHETS ET ENERGIES LIES A LA DECONSTRUCTION	79
ANNEXE 4 : Glossaire		80
ANNEXE 5 : Documents de référence		82

Liste des figures

<i>Figure 1 : Cycle ouvert et flux de matières associés pour un parc de 24 réacteurs EPR2</i>	<i>10</i>
<i>Figure 2 : Cycle avec monorecyclage Pu et flux de matières associés pour le parc de 24 réacteurs EPR2.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 3 : Cycle avec monorecyclages du Pu et URT et pour le parc de 24 réacteurs EPR2 ...</i>	<i>12</i>
<i>Figure 4: Cycle avec multirecyclages du Pu et URT pour le parc de 24 réacteurs EPR2</i>	<i>12</i>
<i>Figure 5: Comparaison des impacts des 4 cycles avec le cycle monorecyclage Pu+URT en base de comparaison.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 6: Répartition des impacts du cycle multirecyclage Pu + URT par étape du cycle de vie</i>	<i>19</i>
<i>Figure 7: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le cycle ouvert (g CO2 eq/kWh).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 8: Contribution par usine et réacteur au "changement climatique" pour le monorecyclage Pu (g CO2 eq/kWh).....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 9: Contribution par usine et reacteurs au "changement climatique" pour le monorecyclage Pu + URT (g CO2 eq/kWh).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 10: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le multi recyclage Pu + URT (g CO2 eq/kWh)</i>	<i>27</i>
<i>Figure 11: Variation de la production de résidus miniers (m3) en fonction de la fermeture du cycle</i>	<i>29</i>
<i>Figure 12: Flux annuels des catégories de déchets TFA et FMA-VC (m3)</i>	<i>29</i>
<i>Figure 13: Flux annuels des catégories de déchets FA-VL, MA-VL et HA (m3).....</i>	<i>30</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Synthèse des hypothèses structurantes retenues</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 2 : Calcul du nombre de piscines pour l'entreposage des combustibles usés non retraités.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3 : Résultats des indicateurs de catégories d'impacts pour les 4 cycles électronucléaires du parc Gen3 de 24 EPR2</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4 : Comparaison multi-critères des 4 cycles estimant le moins impactant.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour un cycle ouvert.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 6 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 7 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu+URT.....</i>	<i>20</i>
<i>Tableau 8: Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le multirecyclage Pu+URT</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 9 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour un cycle ouvert.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 10 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 11 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu+URT</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 12 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le multirecyclage Pu+URT</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 13:Evolution de la consommation d'uranium naturel selon les cycles.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 14: Ecart relatifs entre cycles pour les volumes de déchets bruts</i>	<i>31</i>

Synthèse de l'étude

En réponse à l'article 1^{er} de l'arrêté du PNGMDR 2022-2026, une analyse comparée des indicateurs d'impacts pour l'environnement a été réalisée pour un parc futur de 40 GWe (24 EPR2) en considérant les quatre cycles suivants : (1) un cycle dit ouvert, sans retraitement du combustible usé UOX et donc sans recyclage de matières (plutonium et uranium de retraitement), (2) un cycle avec monorecyclage du plutonium, (3) un cycle avec monorecyclage de l'uranium de retraitement et du plutonium (cycle dit monorecyclage Pu+URT) et (4) un cycle avec multirecyclage de l'uranium de retraitement et du plutonium (cycle dit multirecyclage Pu+URT). La présente note est une mise à jour de la note ref NT-DPS2D-2024-110 déjà transmise au PNGMDR par courrier Orano DPS2D 2024-116 CE du 21 mai 2024 dans laquelle les résultats de l'étude concernaient les cycles 1, 2 et 3.

Les quatre scénarios sur lesquels s'appuie cette étude prennent en compte, de la construction jusqu'au démantèlement en passant par l'exploitation des installations, les mines, les usines de traitement-recyclage du cycle et les réacteurs, les installations d'entreposage intermédiaire et de stockage, ainsi que les flux de matières et de déchets et transports associés mis en jeu dans chaque cas. Concernant les mines, le mix minier pris en compte dans l'étude est le mix actuel. Pour le stockage des déchets HA dans le « cycle ouvert », l'étude prend en compte une modélisation simplifiée basée sur l'extrapolation de données ANDRA.

Globalement, les résultats montrent que la majorité des indicateurs environnementaux s'améliore avec le niveau de fermeture du cycle, notamment pour les trois indicateurs ayant le meilleur niveau de robustesse : « *-changement climatique* », « *particules fines* » et « *appauvrissement de la couche d'ozone* ». Par rapport à un cycle ouvert, cette amélioration est modérée dans les scénarios de monorecyclage (le monorecyclage Pu+URT étant meilleur que le monorecyclage du PU seul) et nettement plus prononcée dans le scénario de multirecyclage Pu+URT. **Ce scénario est donc globalement le plus favorable des scénarios étudiés.** Les économies d'uranium permises par le multirecyclage sont particulièrement dimensionnantes pour l'ACV. Elles induisent mécaniquement une réduction des activités de l'amont du cycle, en limitant particulièrement les activités minières qui concentrent une partie importante des impacts environnementaux.

Dans le détail, l'analyse des résultats obtenus pour chaque étape du cycle (extraction, conversion, enrichissement, fabrication combustibles UOX, réacteurs, retraitement et fabrication MOX, cycle URT, entreposage et stockage) fait apparaître les éléments suivants¹ :

1. Parmi les différentes phases de vie du cycle (construction, fonctionnement, transport, démantèlement), quel que soit le scénario, c'est la phase de fonctionnement qui est en majeure partie à l'origine des impacts, à l'exception de l'indicateur « *Effets toxicologiques sur la santé humaine : substances cancérogènes* » dont la contribution principale vient de la phase de construction. La contribution du démantèlement est faible par rapport aux étapes de construction et fonctionnement, celle des transports est quasi-négligeable, quel que soit le cycle considéré
2. Au sein de la phase de fonctionnement, en cycle ouvert, les activités minières sont prédominantes pour 12 indicateurs sur 16. Les économies en uranium naturel, croissantes avec le degré de fermeture du cycle, permettent d'améliorer la majorité des indicateurs en réduisant les impacts liés à l'exploitation des mines d'uranium. Pour seulement deux indicateurs, « *écotoxicité d'eau douce* » et « *épuisement des ressources en eau* », la contribution principale vient du fonctionnement des réacteurs (avec respectivement 58% et 98% dans le cas du multirecyclage) ;
3. Au sein de la phase de construction, la construction des réacteurs constitue l'étape la plus impactante, notamment pour l'indicateur « *écotoxicité d'eau douce* » (représentant 91% dans

¹ Les indicateurs d'impact ACV doivent être utilisés dans le strict cadre des 4 étapes de la méthode intégrée ACV. Destinés à l'analyse du cycle de vie du système étudié (en l'occurrence différentes configurations du cycle du combustible), ils n'ont pas pour ambition d'évaluer un impact local, ni de remplacer les études d'impacts des différentes installations étudiées, tenant compte des spécificités locales des sites. Ces études sont en effet réalisées sur la base de paramètres locaux, des résultats des rejets réels et des données de la surveillance de l'environnement local (par exemple : évaluation de la dose en Sv pour évaluer l'impact des émissions radiologiques). L'indicateur « changement climatique » est quant à lui une exception, compte tenu de son caractère global et de sa robustesse.

le cas du multirecyclage). Ce résultat est vrai pour tous les cycles, (le parc considéré étant le même quel que soient les scénarios), à l'exception de l'indicateur « *Effets toxicologiques sur la santé humaine : substances cancérigènes* », pour lequel les usines de l'aval deviennent le contributeur principal en mono et multirecyclage ;

Concernant l'indicateur « *changement climatique* », ce dernier suit la tendance d'amélioration avec la fermeture du cycle, bénéficiant de la réduction des activités minières, principal contributeur des émissions de CO₂. Ainsi, le multirecyclage ressort comme nettement plus performant sur cet indicateur, permettant une réduction des émissions de CO₂ de 16% par rapport au cycle ouvert. On observe également que la construction des réacteurs est, quel que soit le cycle, un contributeur important (~20%). En outre, le multirecyclage se démarque particulièrement sur les deux autres indicateurs les plus robustes, « *particules fines* » et « *appauvrissement de la couche d'ozone* », avec, par rapport au cycle ouvert, une réduction des impacts d'un tiers pour le premier et de moitié pour le second.

Enfin, concernant les déchets, le volume de la catégorie HA diminue avec le degré de fermeture du cycle (division par 4 entre un cycle ouvert et un cycle en multirecyclage Pu+URT). A l'inverse, les volumes de déchets de catégorie FMA-VC et surtout MA-VL augmentent en raison des étapes de l'aval du cycle (respectivement +24% et +243% entre cycle ouvert et cycle en multirecyclage Pu+URT). En cycle avec recyclage, et particulièrement en multirecyclage, l'augmentation des déchets MA-VL (et FMA-VC) est toutefois à mettre en regard de la diminution des déchets HA-VL qui sont les déchets les plus pénalisants en termes de radiotoxicité.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs (PNGMDR) 2016-2018 (article 9), le CEA, EDF et Orano ont réalisé une analyse comparée des impacts sur l'environnement du cycle actuel (monorecyclage du seul plutonium) et d'un cycle ouvert², référencée par la suite (ACV 2018).

Dans le cadre du nouveau PNGMDR 2022-2026, l'arrêté du 9 décembre 2022 pris en application du décret n° 2022-1547 du 9 décembre 2022 prévu par l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs prévoit en son article 1 que :

« Art. 1er. – Le commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), les sociétés EDF SA et Orano, en lien avec l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), remettent, avant le 31 décembre 2022, au ministre chargé de l'énergie, une première version de l'étude prévue par l'action nommée POL.1 du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) et remettent, avant le 31 décembre 2023, au ministre chargé de l'énergie, la version finale de l'étude prévue par l'action nommée POL.1 du PNGMDR. »

L'action POL.1 vise à « éclairer les choix de la politique énergétique en explicitant les enjeux qu'ils posent pour la gestion des matières et des déchets radioactifs ». Dans son édition 2022-2026, le PNGMDR demande ainsi au CEA, EDF et Orano, en lien avec l'Andra et le ministère chargé de l'Énergie, de réaliser une étude visant à approfondir les bilans de l'étude précédente susmentionnée en s'efforçant notamment de répondre aux problématiques posées en conclusion de cette première étude par la comparaison des différents facteurs considérés dans les options de retraitement des combustibles usés.

La présente note est une mise à jour de la note ref NT-DPS2D-2024-110 déjà transmise au PNGMDR par courrier Orano DPS2D 2024-116 CE du 21 mai 2024 dans laquelle les résultats de l'étude concernaient l'ACV comparative des 3 cycles suivants ; cycle ouvert, monorecyclage Pu et monorecyclage Pu+URT. Cette mise à jour contient l'analyse d'un quatrième cycle, le multirecyclage Pu + URT.

2. OBJECTIFS ET PERIMETRE DE L'ETUDE REALISEE

L'objectif de cette étude est de comparer sur le plan environnemental quatre scénarios de cycle du combustible nucléaire. Ces quatre scénarios sont les suivants :

1. Un cycle dit ouvert, sans retraitement du combustible usé UOX et donc sans recyclage de matières plutonium et uranium de retraitement ;
2. Un cycle avec traitement du combustible usé UOX et monorecyclage du plutonium en combustible MOX mais sans recyclage de l'URT, comparable à celui pratiqué aujourd'hui en France jusqu'à début 2024 ;
3. Un cycle avec traitement du combustible usé UOX et monorecyclage du plutonium en combustible MOX, associé à un recyclage de l'URT en combustible URE, tel qu'il a été pratiqué en France de 1994 à 2013 dans quelques réacteurs avant de reprendre progressivement depuis fin 2023 ;
4. Un cycle avec multi recyclage des combustibles UOX, MOX et URE et fabrication de MOX et d'URE à partir du Pu et de l'URT.

² Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire « monorecyclage pu » et d'un cycle ouvert, Orano, CEA, EDF, Décembre 2018.

Cette étude comparative des différents cycles est réalisée sur la base commune d'un parc futur (parc dit de génération 3 – GEN3 d'environ 40 GWe constitué de 24 réacteurs EPR2 de 1650 MW) à l'équilibre (Cf. Paragraphe 2.1). L'étude se place ainsi à l'horizon 2085, soit après la date prévisionnelle d'arrêt de l'EPR de Flamanville (FLA 3) en considérant son démarrage en 2024 et une durée de fonctionnement de 60 ans.

L'étude a été réalisée par le CEA, en lien avec Orano et EDF, avec le logiciel du commerce GaBi dont le modèle est présenté en **Annexe 1**.

Les 4 cycles modélisés sur la base du parc défini ci-dessus et les flux associés sont présentés ci-après (cf. paragraphe 2.2). Toutes les installations industrielles de l'amont (mines, conversion, enrichissement, fabrication) et de l'aval (traitement, recyclage, entreposage, stockage) du cycle du combustible mises en jeu dans les scénarios étudiés ont été prises en compte, et ce sur toute la phase de vie des installations, à savoir de la construction au démantèlement en passant par l'exploitation. Les transports associés sont aussi pris en compte.

Les hypothèses structurantes de modélisation des cycles étudiés sont définies au paragraphe 3. L'ensembles des hypothèses sont détaillées en **Annexe 3**.

Utilisation et portée des résultats de l'ACV

La présente ACV vise à comparer différents cycles du combustible sur des indicateurs variés et ne se substitue pas à une analyse fine de chaque indicateur. Ainsi, il convient de rappeler que les résultats de l'ACV ne prévalent pas sur des calculs ou trajectoires issus d'études dédiées, analysant le cycle en dynamique.

En effet, l'utilisation du logiciel GaBi induit une analyse statique, dans laquelle un moment dans le temps a été fixé pour estimer les flux de matières du cycle. Or, tous cycles avec recyclage, monorecyclage ou multirecyclage implique nécessairement un aspect dynamique, avec des phases transitoires qui diffèrent du point d'équilibre.

Cette simplification est nécessaire pour la conduite de l'ACV mais mène inévitablement à des approximations dans les résultats. Par exemple, les économies d'uranium naturel dépendent des phases de déploiement du mono ou multirecyclage, éléments qu'une analyse statique ne peut pas capturer. De la même manière, les besoins d'entreposage des combustibles usés doivent être analysés en dynamique pour être précis.

2.1 DESCRIPTION DU PARC ELECTRONUCLEAIRE CONSIDERE DANS L'ETUDE

Le parc modélisé est un parc dit de « génération 3 » (GEN3) qui repose sur les hypothèses suivantes :

- Réacteurs : 24 EPR2³ ;
- Durée de vie des installations : 60 ans ;
- Capacité électrique totale : 39,6 GWe (1650 MWe/réacteur) ;
- Facteur de charge annuel moyen du parc d'EPR2 : 0,83, conduisant à une production électrique de 288 TWh/an.

2.2 DESCRIPTION DES QUATRE SCENARIOS DE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE ETUDIES

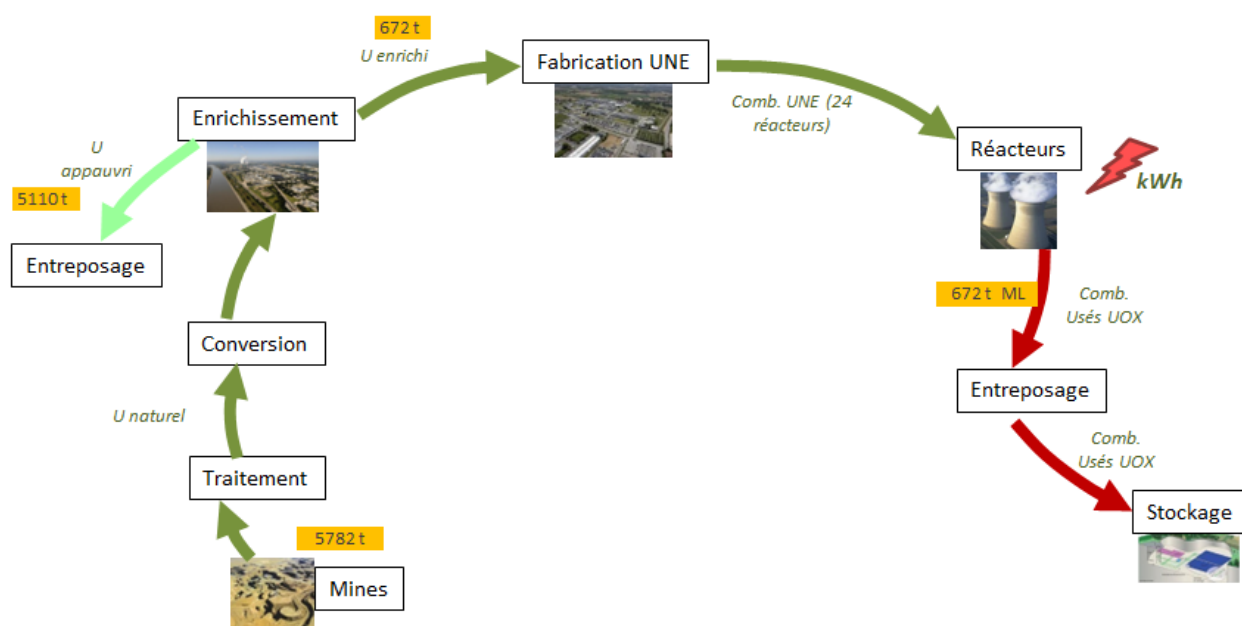
³ Parc nucléaire futur composé d'EPR2 avec une capacité installée 40 GWe (scénario N2 du BP 2050 de RTE). Ce choix de puissance de parc est cohérent avec les hypothèses du scénario prospectif SR1 de l'Inventaire National (IN) 2023.

Les quatre cycles modélisés à des fins d'analyse comparative de leurs impacts environnementaux spécifiques sont décrits dans les paragraphes suivants et illustrés par les figures 1 à 4.

2.2.1 Cycle ouvert (sans retraitement du combustible usé UNE)

Dans ce scénario, il n'y a ni traitement du combustible usé ni recyclage de matières plutonium et uranium de retraitement. Les usines de l'aval du cycle (La Hague et MELOX) n'existent pas et le combustible UNE utilisé dans les 24 réacteurs est donc considéré comme un déchet après son irradiation. Il est entreposé sous eau après son irradiation, avant d'être conditionné pour sa mise au stockage géologique profond.

Figure 1 : Cycle ouvert et flux de matières associés pour un parc de 24 réacteurs EPR2

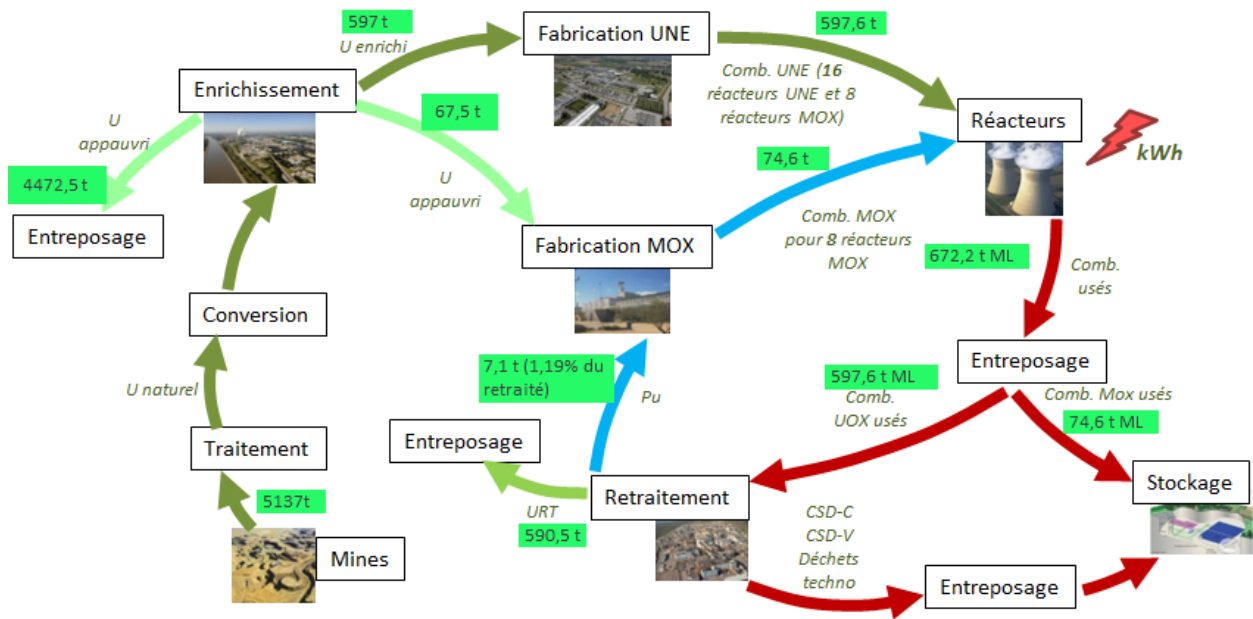


2.2.2 Cycle avec monorecyclage du plutonium (Pu)

Le cycle avec monorecyclage du Pu est comparable à celui pratiqué en France avant la reprise du recyclage de l'URT en combustible URE fin 2023. Dans ce cycle, le combustible usé UNE est traité. Le plutonium issu de ce traitement est recyclé en combustible MOX dans un nombre adapté de réacteurs pour l'équilibre des flux⁴: 16 réacteurs du parc sont alimentés à 100% en combustibles UNE et 8 réacteurs avec 66,7% de combustibles UNE et 33,3% de combustibles MOX.

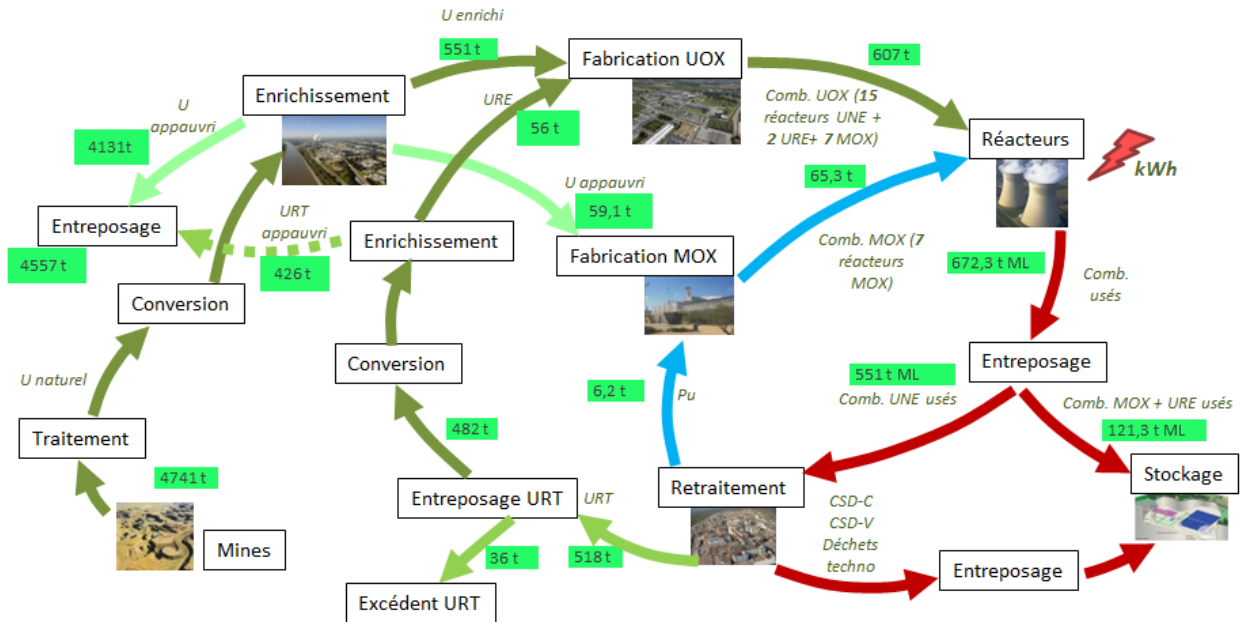
Dans ce scénario, le combustible MOX usé n'est pas traité (monorecyclage) et donc considéré comme un déchet : il est entreposé sous eau après son irradiation, avant d'être conditionné pour sa mise au stockage géologique profond. L'uranium de retraitement issu de ce même traitement n'est pas recyclé, est entreposé et est considéré dans le cadre de cette étude comme un déchet destiné au stockage définitif.

⁴ L'équilibre des flux correspond à l'égalité entre la quantité d'UNE traitée annuellement et la somme de la quantité déchargée et de la quantité consommée de matières U et Pu issues du traitement.

Figure 2 : Cycle avec monorecyclage Pu et flux de matières associés pour le parc de 24 réacteurs EPR2


2.2.3 Cycle avec monorecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)

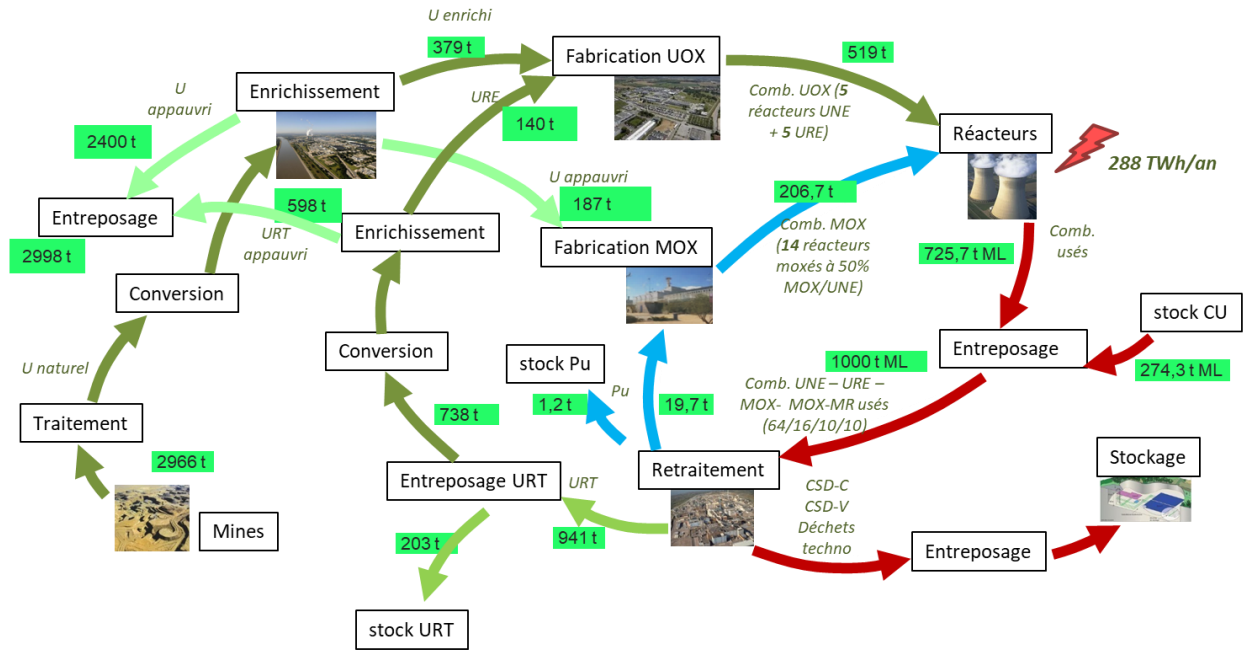
Dans ce scénario, les combustibles UNE sont traités et les matières issues de ce retraitement sont recyclées. Le plutonium est recyclé en combustible MOX et l'URT en combustible URE. Le nombre de réacteurs utilisant les combustibles MOX et URE est adapté pour être au plus proche de l'équilibre des flux : 15 réacteurs du parc sont alimentés à 100% en combustibles UNE, 7 réacteurs avec 66,7% de combustibles UNE et 33,3% de combustibles MOX et les 2 réacteurs restant sont alimentés en combustible URE. Avec ce nombre de réacteurs, la consommation d'URT n'est pas strictement égale à la production au traitement. Une faible partie de l'URT est donc excédentaire et mise en réserve pour une utilisation ultérieure (par exemple pour alimenter temporairement un des réacteurs UNE). Cette mise en réserve n'est pas prise en compte dans le modèle. Dans ce scénario, les combustibles usés MOX et URE ne sont pas traités (monorecyclage) et ils sont donc considérés comme des déchets : ils sont entreposés sous eau après irradiation, avant d'être conditionnés pour leur mise au stockage géologique profond.

Figure 3 : Cycle avec monorecyclages du Pu et URT et pour le parc de 24 réacteurs EPR2


2.2.4 Cycle avec multirecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)

Dans ce scénario, les combustibles UNE, MOX et URE sont traités et les matières issues de ce retraitement sont recyclées. Le plutonium est recyclé en combustible MOX et l'URT en combustible URE. Le nombre de réacteurs utilisant les combustibles MOX et URE est adapté pour être au plus proche de l'équilibre des flux : 5 réacteurs du parc sont alimentés à 100% en combustibles UNE, 14 réacteurs avec 50% de combustibles UNE et 50% de combustibles MOX et les 5 réacteurs restant sont alimentés en combustible URE. Avec ce nombre de réacteurs, l'équilibre est quasiment atteint pour le Pu. Concernant l'URT, sa consommation n'est pas égale à la production au traitement. De fait, une partie de l'URT est excédentaire et mise en réserve pour une utilisation ultérieure (par exemple pour alimenter temporairement un des réacteurs UNE). Cette mise en réserve n'est pas prise en compte dans le modèle.

Figure 4: Cycle avec multirecyclage du Pu et URT pour le parc de 24 réacteurs EPR2



2.3 UNITE FONCTIONNELLE

L'unité fonctionnelle sera la production d'1 MWh d'électricité nucléaire nette produite et injectée dans le réseau, en prenant en compte toutes les installations et les transports (flux) nécessaires du cycle français.

3. PRINCIPALES HYPOTHESES RETENUES SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Les hypothèses associées à une même installation (durée de vie, localisation ...) mise en jeu dans différents scénarios sont identiques pour tous ces scénarios. Seul le niveau de recyclage dans les réacteurs de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu) issu du traitement est adapté au type de scénario étudié : sans traitement-recyclage, avec traitement et monorecyclage du Pu seul, avec traitement et multirecyclage du Pu et d'une majeure partie de l'URT.

Cette étude ayant pour objectif d'approfondir l'analyse comparative des enjeux environnementaux d'un cycle avec monorecyclage Pu avec un cycle ouvert, telle que réalisée en décembre 2018 par le CEA, EDF et Orano dans le cadre du précédent PNGMDR, la majeure partie des hypothèses de cette précédente étude ont donc été reconduites pour des raisons de cohérence et *in fine* d'analyse comparative. Une synthèse des hypothèses est fournie dans le tableau 1 ci-après et les détails sont rappelés en **Annexe 3**.

3.1 SYNTHESE DES HYPOTHESES STRUCTURANTES

Tableau 1: Synthèse des hypothèses structurantes retenues

Installation	Nombre	Localisation (installations considérées)	Durée de fonctionnement (an)	Mix énergétique pour la fabrication, exploitation, démantèlement	Combustibles en réacteurs



Mine	3 (de 3 types différents : MCO, MS, ISL)	MCO et MS : Niger ISL : Kazakhstan	60	2019 pour la fabrication et l'exploitation (74 g CO ₂ eq/kWh) sauf le DEM : 2030 (47 g CO ₂ eq/kWh, selon RTE) Uniforme pour toutes les usines (fera l'objet d'une étude de sensibilité)	
Conversion	UNE : 2 URE : 2	UNE : Malvés et Pierrelatte URE : lieu non défini en France	60		
Enrichissement	UNE : 1 URE : 1	UNE : Pierrelatte URE : Pierrelatte (ligne dédiée)	60		
Fabrication	UNE : 1 URE : 1 MOX : 1	UNE et URE : Romans MOX : Marcoule	60		
Réacteurs	24 (EPR2)	France dont : - 12 en bord de mer, refroidis en circuit ouvert - 12 en bord de cours d'eau (tous avec aéroréfrigérant)	60		Cycle ouvert : 24 réacteurs UNE Cycle avec recyclage Pu seul : 16 réacteurs UNE 8 réacteurs MOX Cycle avec recyclage Pu + URT : 15 réacteurs UNE 7 réacteurs MOX 2 réacteurs URE Cycle avec multirecyclage Pu + URT : 5 réacteurs UNE 14 réacteurs MOX 5 réacteurs URE
Entreposage CU en piscines (1 piscine = 5000 tonnes / voir § 3.2)	Cycle ouvert : 11 Cycle avec recyclage Pu : 2 Cycle avec recyclage Pu + URT : 3 Cycle avec multirecyclage Pu + URT : 0	La Hague (on ne comptabilise pas les piscines BK des centrales, qui ne conservent les CU que 3-4 ans)	60		
Traitement CU	Pour les cycles avec (multi)recyclage : 1	La Hague	60		
Entreposage déchets	Nombreuses installations intermédiaires	Pratiquement sur tous les sites du cycle	Pas pris en compte dans le modèle car intrants compris dans les sites (gazole de manutention)		
Stockage déchets	Filière TFA (Cires) : 1 Filière FMA-VC (CSA) : 1 Filière HA-MAVL (Cigéo) : 1	Morvilliers Soulaines Bure	NA	2019 pour la fabrication et l'exploitation, pas de DEM par définition	

La durée de vie des EPR et des installations du cycle (hors entreposage et stockage) est de 60 ans. La durée de vie des piscines d'entreposage du combustible utilisé et des installations de stockage de déchets est de 100 ans.

Le mix 2019 a été pris en compte pour la modélisation, à la fois pour la construction et le fonctionnement des réacteurs EPR2 et des usines. Pour le démantèlement, le mix électrique de 2030 a été considéré, soit une production d'électricité nucléaire en France de 62 % (362 TWh/an sur 588 TWh/an) (cf. Annexe 3).

L'hypothèse nominale retenue pour la modélisation du recyclage de l'URT est de considérer un recyclage de l'URT avec les mêmes procédés et installations que pour la filière actuelle, mais localisés en France. Pour la conversion les Inventaires proviennent des ateliers de Comurhex Pierrelatte, fermés dans les années 2000. Les effluents de conversion sont considérés comme vitrifiés.

Pour chaque scénario, le nombre de piscines à construire pour l'entreposage des combustibles usés non retraités a été calculé.

Les calculs reposent sur la durée de refroidissement des combustibles usés préconisée par l'Andra avant mise au stockage : 80 ans pour les UNE et URE, 150 ans pour les MOX. On considère que le parc EPR2 est renouvelé par un parc identique, on calcule ainsi le nombre de piscine maximum en service simultanément.

La référence retenue pour la taille d'une piscine est celle de la piscine de La Hague, d'une capacité d'environ 5000 tML.

Tableau 2 : Calcul du nombre de piscines pour l'entreposage des combustibles usés non retraités

Flux de CU (tmli/an)	Cycle ouvert	Cycle avec monorecyclage Pu	Cycle avec monorecyclage Pu + URT	Cycle multirecyclage Pu+URT
Combustibles usés				
UOX	672			
MOX ou MR		74,6	65,3	0
URE			56,0	0
Masse de combustible usé accumulé en fin de refroidissement (tmli)	53 760	< 11 190	14275	0
Nombre de piscines nécessaires à l'équilibre	11	2	3	0

Dans le cas du scénario de monorecyclage Pu, le nombre de piscines est arrondi à 2 car les premiers cœurs des réacteurs MOX ne sont pas alimentés en combustibles MOX, le nombre de combustibles MOX à entreposer est donc surestimé.

De manière générale, le calcul du nombre de piscines d'entreposage suit une logique statique, inhérente à la modélisation choisie. Par conséquent, ces estimations sont en écart avec la réalité, ou du moins avec des analyses plus fines, prenant en compte la dynamique du cycle. Cette méthode mène par exemple à un nombre nul de piscine en multirecyclage, alors qu'on sait que même ce scénario nécessitera des capacités d'entrepôts intermédiaires. En revanche, pour la comparaison inter-cycle, cette méthode reste acceptable, dans la mesure où la tendance globale est correcte. En effet, le traitement permet naturellement de réduire les besoins en entreposage. Ensuite, le besoin légèrement plus important en monorecyclage Pu+URT qu'en monorecyclage Pu s'explique par le fait que l'on traite moins dans ce premier scénario. Enfin, le multirecyclage consiste à traiter les MOX et URT, qui auraient été entreposés en monorecyclage, d'où la nouvelle réduction du nombre de piscines.

4. RESULTATS DE L'ETUDE POUR LE PARC FUTUR DE 24 EPR2 ET INTERPRETATIONS

4.1 RESULTATS DES INDICATEURS DE CATEGORIES D'IMPACT POUR LES 3 CYCLES

On rappelle l'unité fonctionnelle adoptée : production de 1 MWh d'électricité nucléaire fournie au réseau. Les résultats d'impacts pour les quatre cycles électronucléaires du parc futur de 24 EPR2 sont donnés dans le Tableau 4.

La robustesse de chacun des indicateurs évalués dans cette présente analyse de cycle de vie est précisée en **Annexe 2**.

Tableau 3 : Résultats des indicateurs de catégories d'impacts pour les 4 cycles électronucléaires du parc Gen3 de 24 EPR2

Catégorie d'impact étudié pour la méthode EF 3.0	Cycle ouvert	Recyclage Pu	Recyclage Pu et URT	Cycle multirecyclage Pu et URT
Climate Change [kg CO2 eq.]	3,2	3,1	3,0	2,7
Acidification [Mole of H+ eq.]	2,7E-02	2,5E-02	2,3E-02	1,7E-02
Ecotoxicity, freshwater [CTUe]	7,6E+01	7,1E+01	6,4E+01	7,0E+01
Eutrophication, freshwater [kg P eq.]	7,7E-06	7,7E-06	7,7E-06	7,6E-06
Eutrophication, marine [kg N eq.]	6,1E-03	6,7E-03	6,4E-03	6,1E-03
Eutrophication, terrestrial [Mole of N eq.]	5,1E-02	4,8E-02	4,5E-02	3,4E-02
Human toxicity, cancer [CTUh]	7,8E-09	1,1E-08	1,0E-08	1,0E-08
Human toxicity, non-cancer [CTUh]	3,5E-08	3,3E-08	3,2E-08	3,0E-08
Ionising radiation, human health [kBq U235 eq.]	1,1E+03	1,4E+03	1,3E+03	1,3E+03
Land Use [Pt]	9,9E+02	9,3E+02	8,7E+02	6,3E+02
Ozone depletion [kg CFC-11 eq.]	7,6E-08	6,8E-08	6,2E-08	3,9E-08
Particulate matter [Disease incidences]	1,8E-07	1,7E-07	1,6E-07	1,2E-07
Photochemical ozone formation, human health [kg NMVOC eq.]	1,6E-02	1,5E-02	1,4E-02	1,1E-02
Resource use, fossils [MJ]	9,1E+01	8,0E+01	8,1E+01	7,8E+01
Resource use, mineral and metals [kg Sb eq.]	2,6E-06	2,8E-06	2,7E-06	2,7E-06
Water use [m ³ world equiv.]	8,4E+00	8,4E+00	8,4E+00	8,3E+00



Au global, le tableau ci-dessus montre que les indicateurs ont tendance à s'améliorer avec la fermeture du cycle. Il ressort que le cycle ouvert est souvent le plus pénalisant alors que le cycle multirecyclage est souvent le plus favorable. Les couleurs permettent de rendre compte visuellement de cette tendance, on attire cependant l'attention du lecteur sur le fait que les écarts entre cycle sont parfois très faibles et qu'une analyse plus fine est nécessaire.

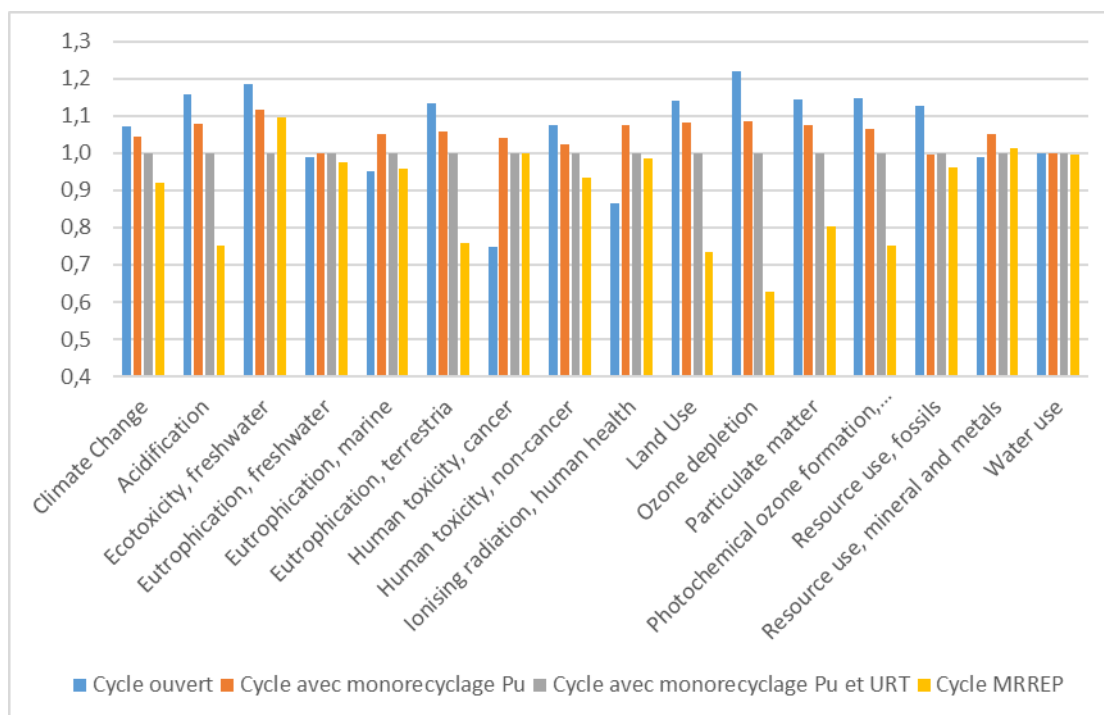
Pour rappel, les indicateurs d'impact ACV doivent être utilisés dans le strict cadre de la méthodologie intégrée ACV. Destinés à l'analyse du cycle de vie du système étudié (en l'occurrence différentes configurations du cycle du combustible), ils n'ont pas pour ambition d'évaluer un impact local, ni de remplacer les études d'impacts des différentes installations étudiées, tenant compte des spécificités locales des sites. Ces études sont en effet réalisées sur la base de paramètres locaux, des résultats des rejets réels et des données de la surveillance

de l'environnement local (par exemple : évaluation de la dose en Sv pour évaluer l'impact des émissions radiologiques).

L'indicateur « *changement climatique* » est quant à lui une exception, compte tenu de son caractère global et de sa robustesse. Le tableau le distingue donc des autres résultats.

La Figure 5, en complément du tableau 5, compare les impacts des quatre cycles en fonction des différents indicateurs comme l'épuisement des ressources en eau, l'eutrophisation eau douce, les particules fines ou l'épuisement des ressources. Les impacts sont comparés par rapport aux impacts du Cycle Recyclage Pu et URT, mis à la valeur de 1.

Figure 5: Comparaison des impacts des 4 cycles avec le cycle monorecyclage Pu+URT en base de comparaison



Le tableau ci-dessous comptabilise le nombre de catégories d'impact pour lesquels un cycle est moins impactant que le cycle de monorecyclage Pu + URT (remarque : cette approche revient à dire que tous les enjeux ont le même poids). Pour rappel, les trois catégories considérées, ayant le meilleur indice de robustesse sont la contribution au changement climatique, les particules fines et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Tableau 4 : Comparaison multi-critères des 4 cycles estimant le moins impactant

Critère de sélection	Cycle ouvert	Recyclage Pu	Recyclage Pu et URT	Cycle multirecyclage
Les 16 catégories	5	3	0	13
Les 16 catégories avec écart > 10%	2	0	0	6
Les 3 catégories ayant le meilleur indice de robustesse (cf. Annexe 2)	0	0	0	3

Par rapport aux cycles avec recyclage, le cycle ouvert n'est significativement favorable pour seulement 2 des 16 indicateurs étudiés : « radiations ionisantes, effets sur la santé » et « effets toxicologiques sur la santé, substance cancérogènes », respectivement de robustesse de niveau 2 et 3 (cf. **Annexe 2**). **Pour les 14 autres indicateurs, les cycles avec recyclage sont équivalents ou favorables, avec dans une grande partie des cas, une amélioration significative en multirecyclage.** L'analyse détaillée de ce tableau est faite en partie **4.3**

Concernant les 3 indicateurs les plus robustes, on constate que si les écarts sur l'indicateur changement climatique (appelé souvent par la communauté Global Warming Potential, GWP) ne sont pas très marqués, plus le recyclage est important, plus l'indicateur évolue favorablement. On constate également une amélioration significative en multirecyclage sur les indicateurs d'« appauvrissement de la couche d'ozone » et des « particules fines »). **Ainsi, le cycle avec multirecyclage Pu+URT a globalement le moins d'impact par comparaison avec les trois autres.**

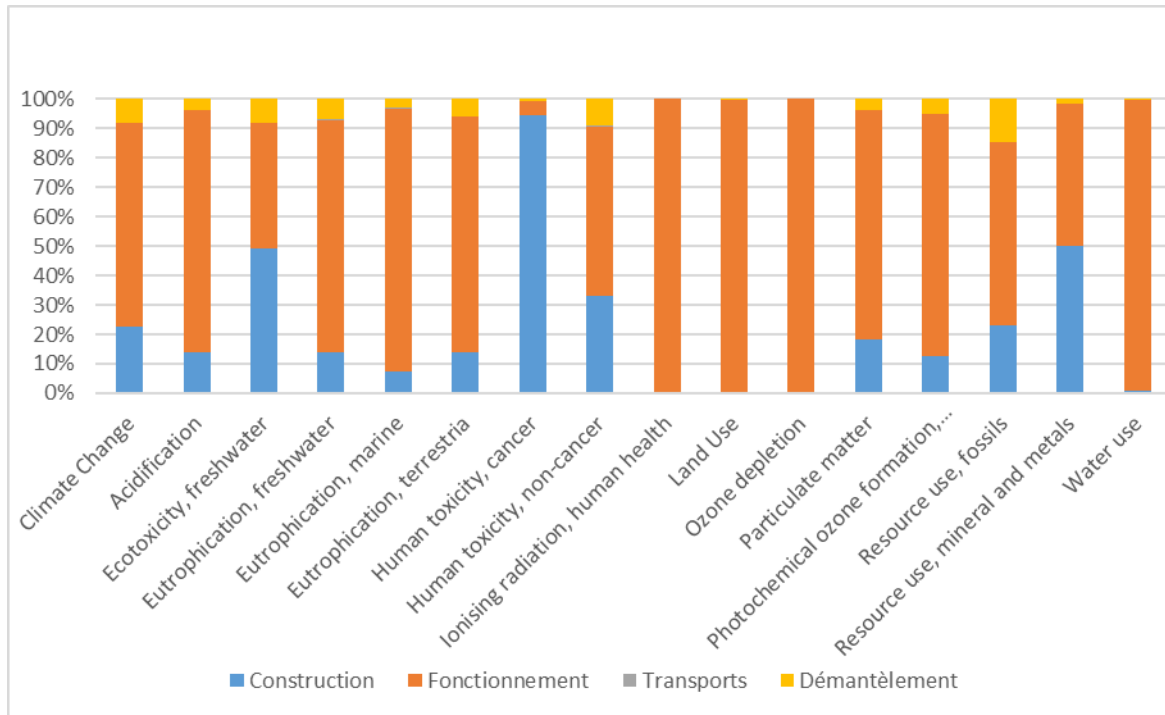
4.2 CONTRIBUTION DES GRANDES PHASES DU CYCLE DE VIE

Le cycle de vie des différentes installations (usines et réacteurs) qui composent un cycle électronucléaire peut se décomposer en quatre phases : la construction, le fonctionnement, les transports et le démantèlement. La modélisation réalisée a permis de séparer les contributions respectives de ces phases sur les indicateurs.

On a fait l'hypothèse que l'énergie nécessaire pour les opérations de démantèlement d'une usine, difficile à estimer à ce jour, est égale à celle pour sa construction.

Les données nécessaires à l'évaluation des déchets de déconstruction proviennent des différents inventaires. Les déchets de démantèlement ont été évalués pour l'ensemble des usines du cycle, à partir de données transmises par Orano et complétées le cas échéant par le CEA [ACV 2018].

Pour les quatre cycles étudiés, les résultats sont extrêmement voisins. On choisit ainsi de ne représenter que le graphe pour le cycle multirecyclage.

Figure 6: Répartition des impacts du cycle multirecyclage Pu + URT par étape du cycle de vie


On observe que le démantèlement ne représente pas un poids important pour l'ensemble des catégories (au maximum environ 16 % pour la catégorie « l'épuisement des ressources énergétiques »).

On constate que pour un seul indicateur (« effets toxicologiques sur la santé, substances cancérigènes »), l'impact est majoritairement dû à la construction, alors que pour trois autres (« radiation ionisante, effet sur la santé », « appauvrissement de la couche d'ozone », « épuisement des ressources en eau »), l'impact provient quasiment seulement du fonctionnement. Pour les autres indicateurs, l'impact provient majoritairement du fonctionnement mais la contribution de la construction est notable (« changement climatique », « écotoxicité d'eau douce », « effets toxicologiques sur la santé, substances non-cancérigènes », « épuisement des ressources »).

Il convient de préciser que les surfaces dédiées aux installations via l'indicateur « usage des terres » ont été intégralement affectées dans le cadre de la modélisation à la période de fonctionnement des usines (en tant qu'intrant), et non à la phase de construction des usines.

On observe également que la part des transports est quasi-négligeable, quel que soit le cycle considéré.

4.3 DETAIL DES IMPACTS PAR ETAPE DU CYCLE

Dans cette section, les contributions des différentes grandes étapes du cycle nucléaire sont données pour chaque catégorie d'indicateur.

4.3.1 Construction des installations

Dans les tableaux suivants, les contributions des étapes de la construction des usines et des réacteurs sont données pour chaque indicateur.

Tableau 5 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour un cycle ouvert

Cycle ouvert	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Entreposage et stockage
Climate Change	9%	7%	2%	2%	72%	9%
Acidification	10%	5%	2%	2%	76%	6%
Ecotoxicity, freshwater	0%	3%	3%	1%	90%	2%
Eutrophication, freshwater	1%	6%	3%	3%	76%	11%
Eutrophication, marine	6%	10%	2%	2%	72%	8%
Eutrophication, terrestrial	6%	10%	2%	2%	72%	8%
Human toxicity, cancer	10%	2%	1%	15%	41%	32%
Human toxicity, non-cancer	4%	5%	2%	2%	78%	9%
Ionising radiation, human health	0%	9%	4%	4%	71%	11%
Land Use	1%	6%	3%	3%	75%	11%
Ozone depletion	2%	0%	1%	1%	96%	0%
Particulate matter	10%	4%	2%	2%	75%	8%
Photochemical ozone formation, human health	7%	9%	2%	2%	73%	8%
Resource use, fossils	3%	9%	4%	3%	70%	10%
Resource use, mineral and metals	5%	1%	1%	7%	71%	15%
Water use	6%	6%	3%	3%	70%	12%

Tableau 6 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu

Monorecyclage Pu	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Entreposage et stockage
Climate Change	9%	6%	2%	2%	73%	6%	3%
Acidification	9%	5%	2%	1%	76%	6%	2%
Ecotoxicity, freshwater	0%	3%	2%	1%	91%	2%	1%
Eutrophication, freshwater	1%	6%	3%	3%	77%	9%	3%
Eutrophication, marine	5%	9%	2%	2%	73%	6%	3%
Eutrophication, terrestrial	5%	9%	2%	2%	73%	6%	3%
Human toxicity, cancer	6%	1%	0%	9%	28%	54%	1%
Human toxicity, non-cancer	4%	4%	2%	2%	80%	6%	3%
Ionising radiation, human health	0%	8%	4%	3%	70%	11%	3%
Land Use	1%	6%	3%	3%	75%	10%	3%
Ozone depletion	1%	0%	1%	1%	95%	1%	0%
Particulate matter	9%	3%	1%	2%	75%	8%	2%
Photochemical ozone formation, human health	6%	8%	2%	2%	74%	6%	3%
Resource use, fossils	3%	8%	3%	3%	70%	10%	3%
Resource use, mineral and metals	4%	1%	1%	5%	59%	30%	0%
Water use	5%	5%	3%	3%	69%	11%	3%

Tableau 7 : Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu+URT

Monorecyclage Pu + URT	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Cycle URT	Entreposage et stockage
Climate Change	8%	6%	1%	1%	74%	5%	1%	3%
Acidification	8%	4%	2%	1%	77%	5%	1%	2%
Ecotoxicity, freshwater	0%	2%	2%	1%	91%	2%	1%	1%
Eutrophication, freshwater	1%	5%	3%	2%	77%	8%	1%	3%
Eutrophication, marine	5%	8%	2%	2%	74%	5%	1%	3%
Eutrophication, terrestrial	5%	9%	2%	2%	74%	5%	1%	3%
Human toxicity, cancer	6%	1%	0%	9%	29%	52%	1%	1%
Human toxicity, non-cancer	3%	4%	2%	1%	80%	6%	1%	4%
Ionising radiation, human health	0%	8%	4%	3%	70%	10%	2%	3%
Land Use	1%	5%	3%	3%	75%	9%	1%	3%
Ozone depletion	1%	0%	1%	1%	96%	1%	0%	0%
Particulate matter	8%	3%	1%	1%	75%	8%	1%	2%
Photochemical ozone formation, human health	6%	8%	2%	1%	75%	5%	1%	3%
Resource use, fossils	3%	8%	3%	3%	70%	9%	1%	3%
Resource use, mineral and metals	4%	1%	1%	5%	61%	28%	1%	1%
Water use	5%	5%	3%	3%	69%	11%	1%	4%

Tableau 8: Contribution des étapes de la construction des usines et des réacteurs pour le multirecyclage Pu+URT

cycle MRREP	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Cycle URT	Entreposage et stockage
Climate Change	8%	6%	1%	1%	74%	5%	1%	3%
Acidification	8%	4%	2%	1%	77%	6%	1%	2%
Ecotoxicity, freshwater	0%	2%	2%	1%	91%	2%	1%	1%
Eutrophication, freshwater	1%	5%	3%	2%	77%	8%	1%	3%
Eutrophication, marine	5%	8%	2%	2%	74%	5%	1%	3%
Eutrophication, terrestrial	5%	9%	2%	2%	74%	5%	1%	3%
Human toxicity, cancer	6%	1%	0%	9%	29%	52%	1%	1%
Human toxicity, non-cancer	3%	4%	2%	1%	80%	6%	1%	4%
Ionising radiation, human health	0%	8%	4%	3%	70%	10%	2%	3%
Land Use	1%	5%	3%	3%	75%	9%	1%	3%
Ozone depletion	1%	0%	1%	1%	96%	1%	0%	0%
Particulate matter	8%	3%	1%	2%	76%	8%	1%	2%
Photochemical ozone formation, human health	6%	8%	1%	1%	75%	5%	1%	3%
Resource use, fossils	3%	8%	3%	3%	70%	9%	1%	3%
Resource use, mineral and metals	4%	1%	1%	5%	61%	28%	1%	1%
Water use	5%	5%	3%	3%	69%	11%	1%	4%

Le tableau relatif au monorecyclage Pu est très semblable dans ses valeurs à celui correspondant au recyclage du Pu et de l'URT, parce que les impacts du sous-cycle URT demeurent très faibles pour un flux de 900 t URT/an.

On constate que dans 15 catégories, les réacteurs sont largement prépondérants. Pour la catégorie « effets toxicologiques sur la santé, substances cancérigènes », les réacteurs sont très peu contributeurs par rapport à l'ensemble du cycle et c'est une autre étape du cycle qui devient majoritaire pour les impacts de la construction :

- Les entreposages/stockages pour le cycle ouvert,
- Le retraitement et la fabrication du MOX pour les trois cycles de traitement

4.3.2 Fonctionnement des installations

Dans les tableaux suivants, les contributions des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs sont données pour chaque indicateur.

Tableau 9 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour un cycle ouvert

Cycle ouvert	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Entreposage et stockage
Climate Change	68%	12%	2%	2%	6%	11%
Acidification	92%	3%	0%	1%	2%	2%
Ecotoxicity, freshwater	42%	5%	6%	1%	11%	35%
Eutrophication, freshwater	14%	3%	4%	1%	57%	21%
Eutrophication, marine	64%	3%	0%	1%	29%	3%
Eutrophication, terrestrial	86%	5%	0%	1%	4%	4%
Human toxicity, cancer	52%	6%	5%	2%	6%	30%
Human toxicity, non-cancer	60%	5%	4%	1%	6%	24%
Ionising radiation, human health	87%	0%	0%	0%	13%	0%
Land Use	75%	2%	1%	1%	20%	1%
Ozone depletion	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Particulate matter	90%	4%	-1%	2%	2%	3%
Photochemical ozone formation, human health	89%	4%	0%	0%	3%	3%
Resource use, fossils	37%	6%	8%	2%	3%	44%
Resource use, mineral and metals	1%	1%	1%	92%	0%	5%
Water use	1%	0%	0%	0%	97%	1%

Tableau 10 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu

Monorecyclage Pu	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Entreposage et stockage
Climate Change	62%	11%	1%	1%	6%	14%	4%
Acidification	89%	3%	0%	1%	2%	5%	1%
Ecotoxicity, freshwater	43%	5%	7%	1%	12%	19%	14%
Eutrophication, freshwater	12%	3%	3%	1%	57%	17%	7%
Eutrophication, marine	51%	2%	0%	0%	26%	19%	1%
Eutrophication, terrestrial	82%	5%	0%	1%	4%	6%	2%
Human toxicity, cancer	51%	6%	5%	2%	7%	19%	11%
Human toxicity, non-cancer	57%	5%	4%	1%	6%	18%	9%
Ionising radiation, human health	62%	0%	0%	0%	10%	27%	0%
Land Use	71%	2%	1%	1%	20%	4%	1%
Ozone depletion	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Particulate matter	86%	4%	-1%	2%	2%	6%	1%
Photochemical ozone formation, human health	86%	3%	0%	0%	3%	5%	1%
Resource use, fossils	40%	7%	9%	2%	4%	21%	18%
Resource use, mineral and metals	1%	1%	1%	85%	0%	10%	2%
Water use	1%	0%	0%	0%	97%	1%	0%

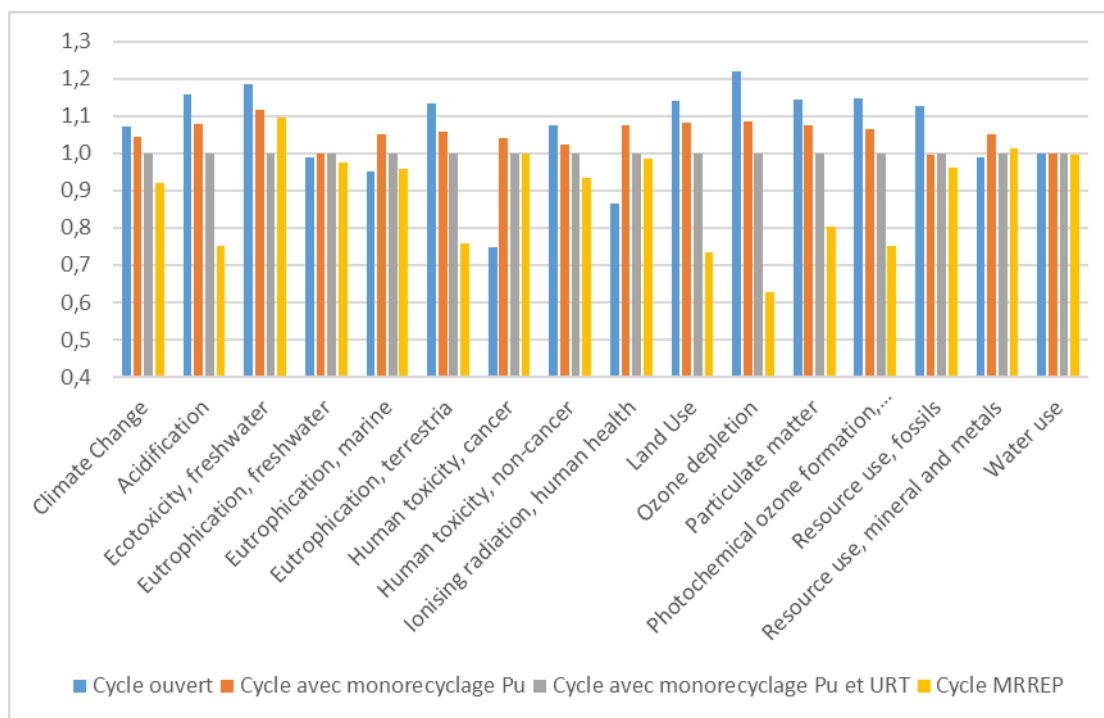
Tableau 11 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le monorecyclage Pu+URT

Monorecyclage Pu + URT	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Cycle URT	Entreposage et stockage
Climate Change	61%	11%	1%	1%	6%	13%	1%	5%
Acidification	88%	3%	0%	1%	2%	5%	0%	1%
Ecotoxicity, freshwater	39%	4%	6%	1%	12%	18%	2%	18%
Eutrophication, freshwater	11%	3%	3%	1%	56%	16%	1%	9%
Eutrophication, marine	49%	2%	0%	0%	27%	19%	0%	1%
Eutrophication, terrestrial	81%	5%	0%	1%	5%	6%	1%	2%
Human toxicity, cancer	47%	5%	5%	2%	7%	18%	2%	15%
Human toxicity, non-cancer	54%	5%	3%	1%	7%	17%	1%	12%
Ionising radiation, human health	62%	0%	0%	0%	11%	27%	0%	0%
Land Use	71%	2%	1%	1%	20%	4%	0%	1%
Ozone depletion	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Particulate matter	85%	4%	-1%	2%	2%	6%	0%	2%
Photochemical ozone formation, human health	85%	3%	0%	0%	4%	5%	0%	2%
Resource use, fossils	37%	6%	8%	2%	3%	19%	2%	23%
Resource use, mineral and metals	1%	1%	1%	82%	0%	10%	2%	2%
Water use	1%	0%	0%	0%	97%	1%	0%	1%

Tableau 12 : Contribution des étapes du fonctionnement des usines et des réacteurs pour le multirecyclage Pu+URT

cycle MRREP	Mines	Conversion	Enrichissement	Fabrication combustible UOX	Réacteurs	Retraitement et fab MOX	Cycle URT	Entreposage et stockage
Climate Change	45%	8%	1%	1%	8%	28%	2%	7%
Acidification	78%	3%	0%	1%	3%	13%	1%	2%
Ecotoxicity, freshwater	27%	3%	4%	1%	12%	36%	3%	15%
Eutrophication, freshwater	8%	2%	2%	0%	58%	17%	3%	9%
Eutrophication, marine	32%	2%	0%	0%	28%	35%	1%	2%
Eutrophication, terrestrial	71%	4%	0%	0%	5%	14%	2%	3%
Human toxicity, cancer	29%	4%	4%	1%	8%	36%	4%	15%
Human toxicity, non-cancer	40%	3%	3%	1%	7%	29%	3%	14%
Ionising radiation, human health	39%	0%	0%	0%	10%	50%	0%	0%
Land Use	60%	2%	1%	1%	24%	9%	1%	2%
Ozone depletion	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Particulate matter	72%	3%	-1%	2%	3%	17%	1%	3%
Photochemical ozone formation, human health	75%	3%	0%	0%	5%	12%	1%	3%
Resource use, fossils	25%	4%	5%	1%	4%	37%	4%	19%
Resource use, mineral and metals	1%	1%	1%	57%	0%	32%	6%	2%
Water use	0%	0%	0%	0%	98%	1%	0%	1%

Grâce à l'analyse des tableaux ci-dessus, on peut revenir en détail sur la comparaison inter cycle de chaque indicateur, illustré par la figure 6 (remise ci-dessous)



L'indicateur « effets toxicologiques sur la santé, substances cancérigènes » est majoritairement impacté par la construction, en particulier celle des réacteurs et usines du cycle, qui contiennent de grandes quantités d'inox. Ces éléments ne variant pas d'un cycle de recyclage à l'autre, cet indicateur ne permet pas de différencier le multirecyclage du monorecyclage.

Pour les autres indicateurs, c'est l'étape de fonctionnement qui permet d'expliquer les variations d'indicateurs entre les cycles.

L'indicateur « épuisement des ressources en eau » est majoritairement impacté par le fonctionnement des réacteurs, il n'est donc pas différenciant dans la comparaison inter cycle.

De manière moins marquée, l'indicateur « eutrophisation eau douce » est lui aussi principalement dépendant du fonctionnement des réacteurs, de fait on observe peu de différence d'un cycle à l'autre sur cet indicateur.

Concernant l'indicateur « épuisement des ressources - minéraux et métalliques », on remarque que la fabrication du combustible est prépondérante, or dans un cycle avec recyclage, les combustibles UOX sont remplacés par des combustibles MOX et URE, cet indicateur varie donc peu en fonction des cycles.

Pour tous les autres indicateurs, c'est la mine (12 fois) et l'entreposage-stockage (1 fois) qui sont majoritaires en cycle ouvert. Le passage en cycle monorecyclage ou multirecyclage permet de réduire les activités minières et de diminuer les besoins en entreposage-stockage. En contrepartie, les usines de l'aval deviennent un contributeur important en cycle avec recyclage, particulièrement en multirecyclage où l'activité de traitement-recyclage est la plus intense.

L'évolution des indicateurs selon les cycles dépend donc de la réduction de l'activité minière (et de l'entreposage-stockage dans une moindre mesure) et de sa compensation par les impacts des usines de l'aval du cycle :

Dans la majeure partie des cas, la baisse d'activité à la mine (et de l'entreposage-stockage dans une moindre mesure) compensent largement les impacts induits par les usines de retraitement ou fabrication de MOX. On assiste alors à une amélioration des indicateurs à mesure que le degré de fermeture du cycle augmente, amélioration souvent flagrante en multirecyclage :

- « Réchauffement climatique »,

- « Effets toxicologiques sur la santé, substances non cancérogènes »,
- « Acidification »,
- « Eutrophisation terrestre »,
- « Usage des terres »
- « Appauvrissement de la couche d’ozone »,
- « Particules fines »,
- « Photochemical ozone formation »
- « Epuisement des ressources fossiles »,

On remarquera que les trois indicateurs les plus robustes sont concernés par cette amélioration.

Dans certains cas plus rares, l’amélioration des indicateurs par la baisse d’activité de la mine (et de l’entreposage-stockage dans une moindre mesure) ne suffit pas à compenser entièrement les impacts des usines de l’aval. On observe alors des situations plus contrastées, pour lesquelles le degré de fermeture du cycle ne va pas de pair avec l’amélioration des indicateurs :

- « Ecotoxicité d’eau douce »,
- « Eutrophisation marine »,
- « Radiation ionisante, effets sur la santé »

On remarquera que ces indicateurs sont de robustesse de niveau 2 et 3.

On conclut donc que le scénario de multi recyclage est au global le plus favorable, dans la mesure où c’est celui qui permet les économies les plus conséquentes sur les activités minières. Les rares cas où le multi recyclage n’est pas le plus favorable correspondent aux indicateurs très sensibles vis-à-vis de l’activité de traitement, le multi recyclage étant le plus intensif sur cet aspect (1000 ml traités en multirecyclage contre 552 en monorecyclage Pu+URT).

4.4 PRINCIPAUX CONTRIBUTEURS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans cette section, un focus sur l’indicateur « changement climatique » est effectué. C’est aujourd’hui l’indicateur ACV le plus couramment utilisé, tant pour sa robustesse que pour l’importance de l’enjeu environnemental évalué. On a vu précédemment qu’il est composé majoritairement de l’étape de fonctionnement (70%), mais celle de construction représente près de 20% (Figure 6). Dans cette section, nous donnons les contributions de chaque composante de ces deux étapes du cycle de vie.

4.4.1 Contribution au changement climatique de la construction et du fonctionnement

Compte tenu de la remarque évoquée au § 4.2 relatives au démantèlement des installations, la contribution au changement climatique du démantèlement n’est pas détaillée ci-après.

Les étapes du cycle ont été désignées de façon générique dans les trois figures ci-dessous. Les résultats obtenus correspondent néanmoins à l’impact d’usines précises, avec leurs inventaires de 2016 tels que listés en annexe 3, qui peut s’avérer pénalisant (ex : l’impact sur le réchauffement climatique de la mine souterraine et de son usine de traitement associée correspond à celle de Commina, et la valeur est élevée en raison du mix minier retenu qui inclut 54% d’une mine souterraine).

Figure 7: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le cycle ouvert (g CO2 eq/kWh)

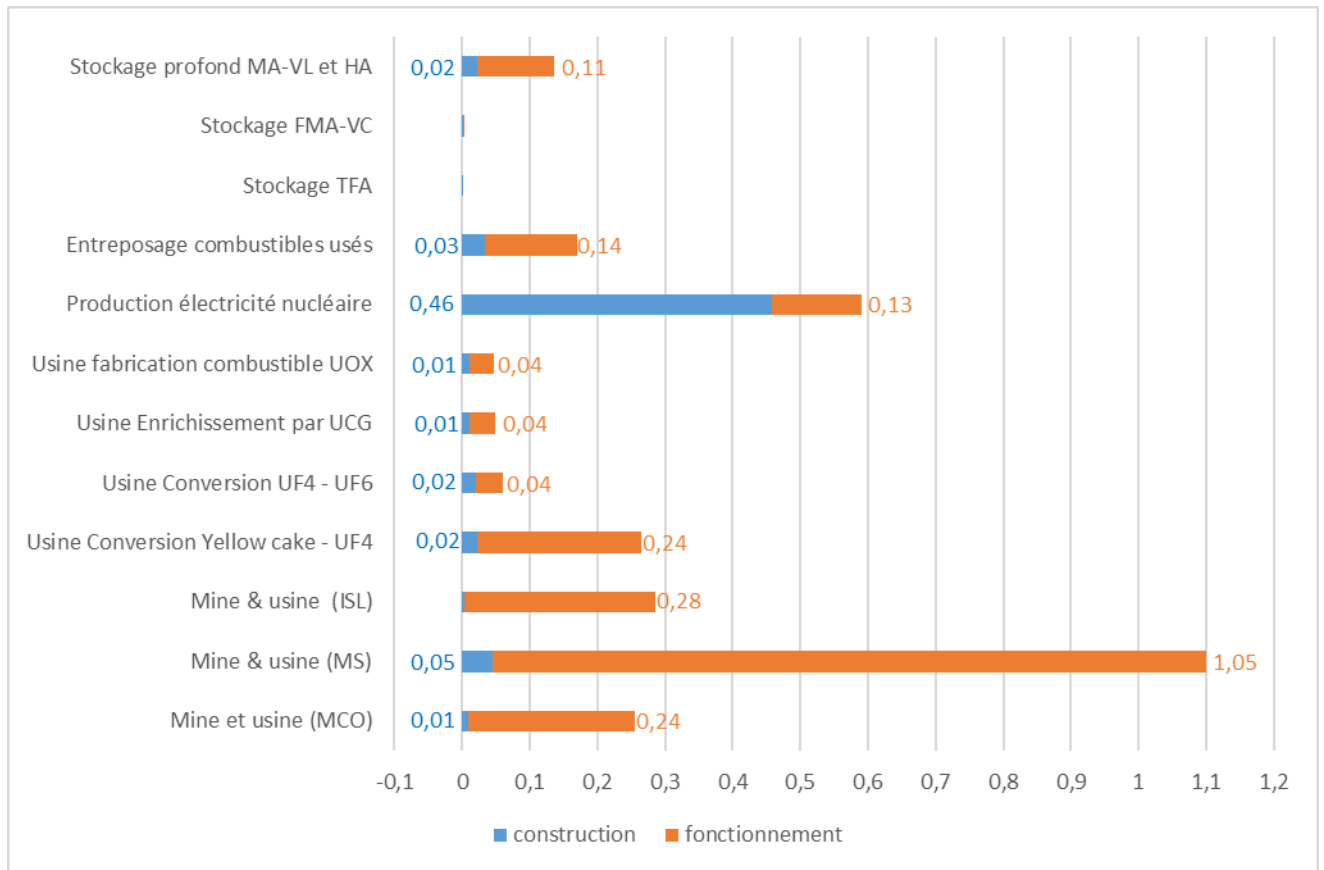


Figure 8: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le monorecyclage Pu (g CO2 eq/kWh)

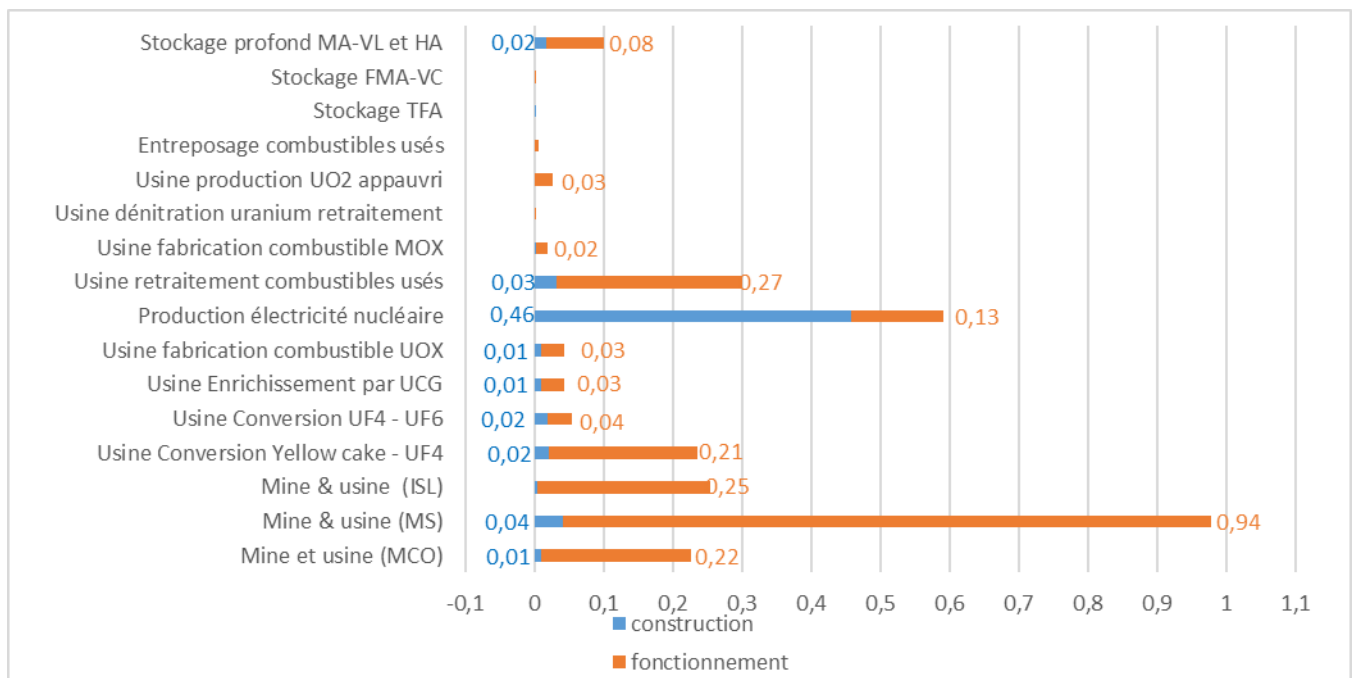


Figure 9: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le monorecyclage Pu + URT (g CO2 eq/kWh)

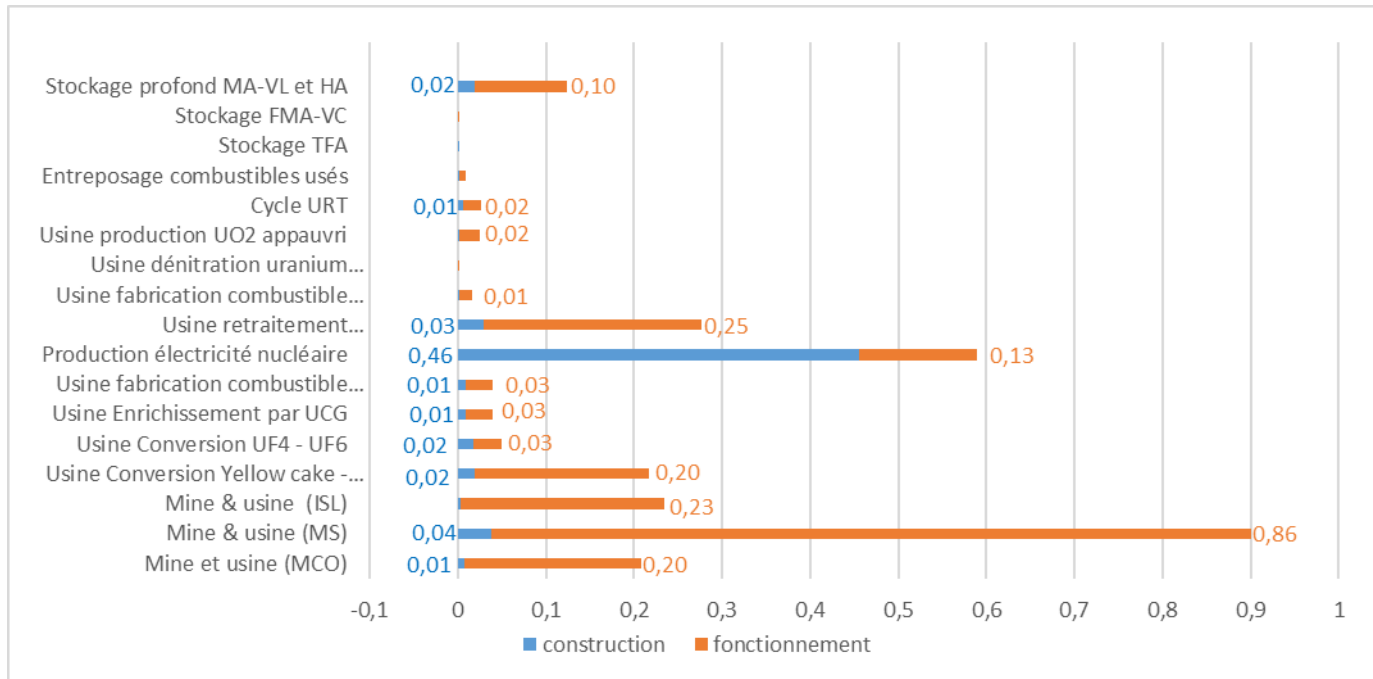
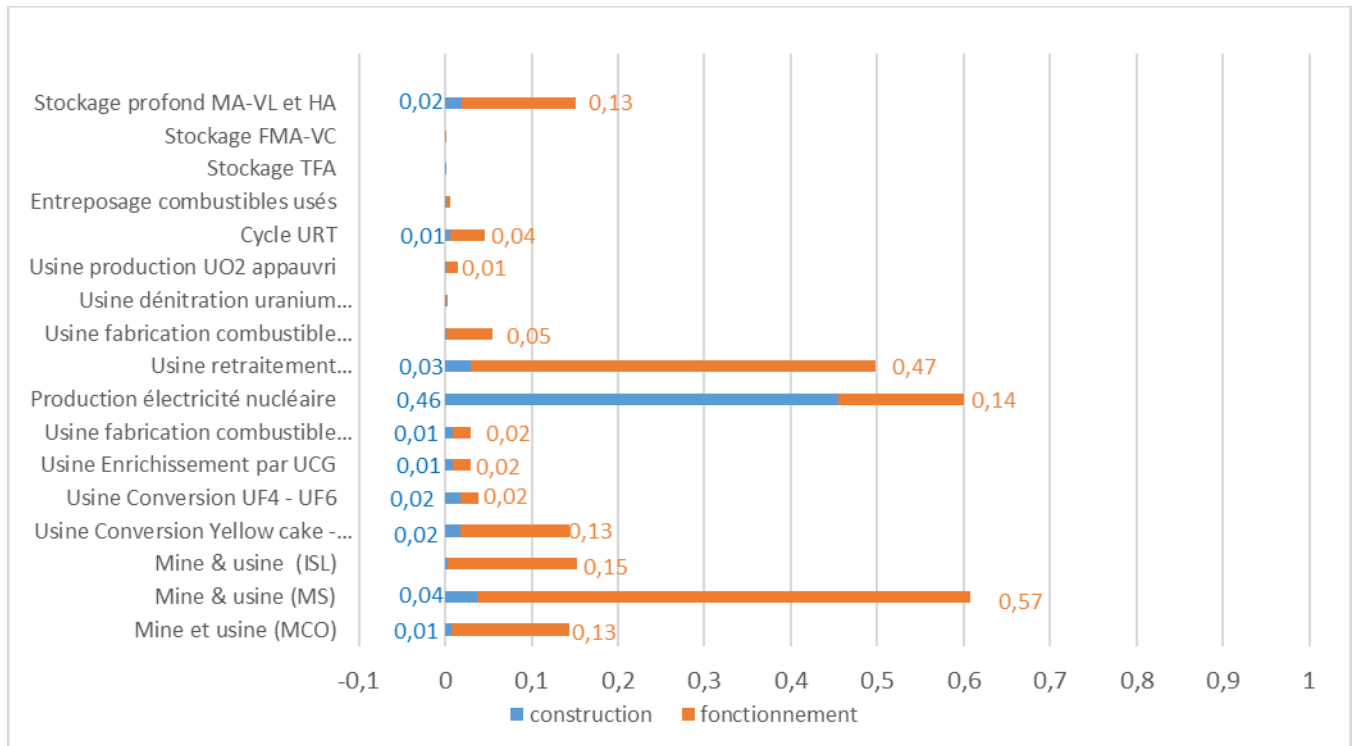


Figure 10: Contribution par usine et réacteurs au "changement climatique" pour le multi recyclage Pu + URT (g CO2 eq/kWh)



Pour les quatre cycles, on constate que les plus forts contributeurs au changement climatique sont les suivants :

- la construction des réacteurs (bétons, aciers);

- le fonctionnement des mines et usines associées (en particulier modèle de mine souterraine utilisant du lignite pour fournir son électricité).

La construction des réacteurs est invariante selon les cycles et le traitement-recyclage permet des économies d'uranium naturel, par conséquent l'indicateur de réchauffement climatique s'améliore à mesure que le degré de fermeture du cycle augmente.

4.5 ECONOMIE DE RESSOURCES NATURELLES

Avant toute interprétation il est utile de rappeler que les indicateurs « épuisement des ressources fossiles » et « minérales, métalliques » sont classés parmi les moins robustes (cf. **Annexe 2**). Globalement, ces indicateurs ne ressortent pas comme les plus différenciants entre les cycles, on note tout de même une légère amélioration de l'indicateur « épuisement des ressources fossiles » en cycle avec recyclage par rapport au cycle ouvert. En revanche, il est pertinent de s'intéresser aux économies de ressource en uranium naturel, ces résultats sont la conséquence directe du traitement-recyclage et sont plus facilement interprétables. De plus, comme cela été détaillé plus haut, les économies d'uranium naturel sont synonymes d'une activité minière moins intensive, bonifiant ainsi un grand nombre d'autres indicateurs. A noter aussi que les économies en uranium naturel permises par l'utilisation de combustible MOX, s'accompagnent d'économies sur tous les réactifs nécessaires aux transformations de l'amont du cycle.

Le tableau suivant présente l'évolution de la consommation d'uranium naturel pour chacun des cycles et l'écart en pourcentage par rapport au cycle avec mono recyclage Pu. Comme rappelé plus haut, ces flux d'uranium sont calculés pour un parc à l'équilibre, d'où les écarts avec des études dédiées analysant le cycle en dynamique.

Tableau 13: Evolution de la consommation d'uranium naturel selon les cycles

	Una (t/an)	(%)
Cycle ouvert	5782	+ 11,4
Cycle avec mono recyclage Pu	5137	
Cycle avec mono recyclage Pu et URT	4741	- 8,7
Cycle multirecyclage Pu et URT	2966	- 43,0

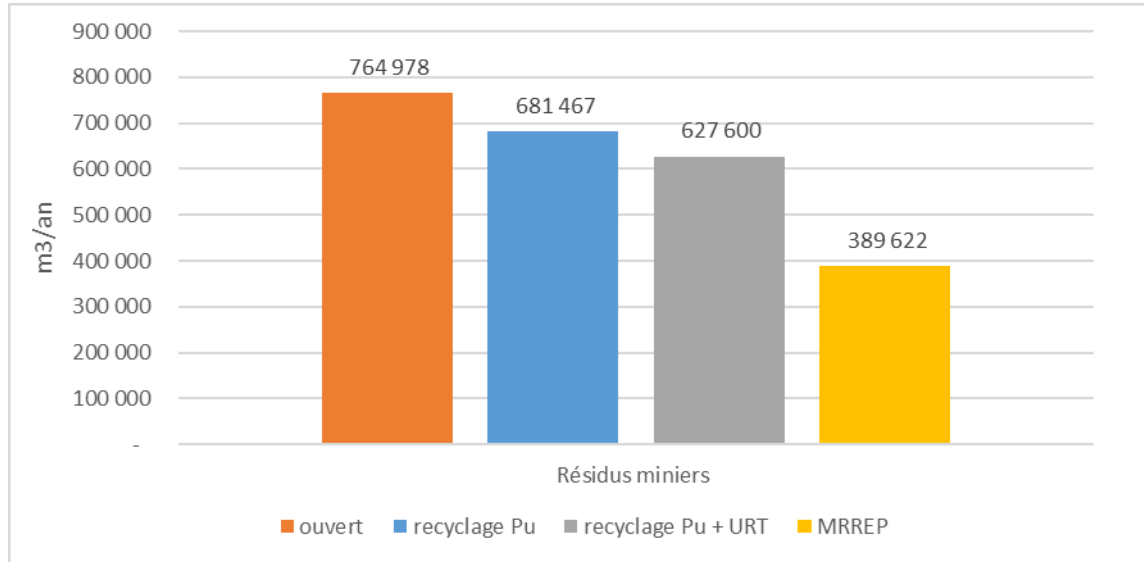
Comme il a été précisé en introduction, ces ordres de grandeurs résultent d'une analyse statique et ne prévalent en rien sur les résultats d'analyses dédiées aux économies de matières en mono et multirecyclage.

5. ENSEIGNEMENTS SUR LES DECHETS

Les volumes de déchets nucléaires ne constituent pas un indicateur dans les méthodes conventionnelles d'ACV. Ils sont calculés à partir des bilans matière des différentes catégories produites aux étapes successives des cycles. Les résultats présentés constituent une première approche des enseignements sur les déchets du parc de 40 GW d'EPR2, qui nécessitera d'être consolidée.

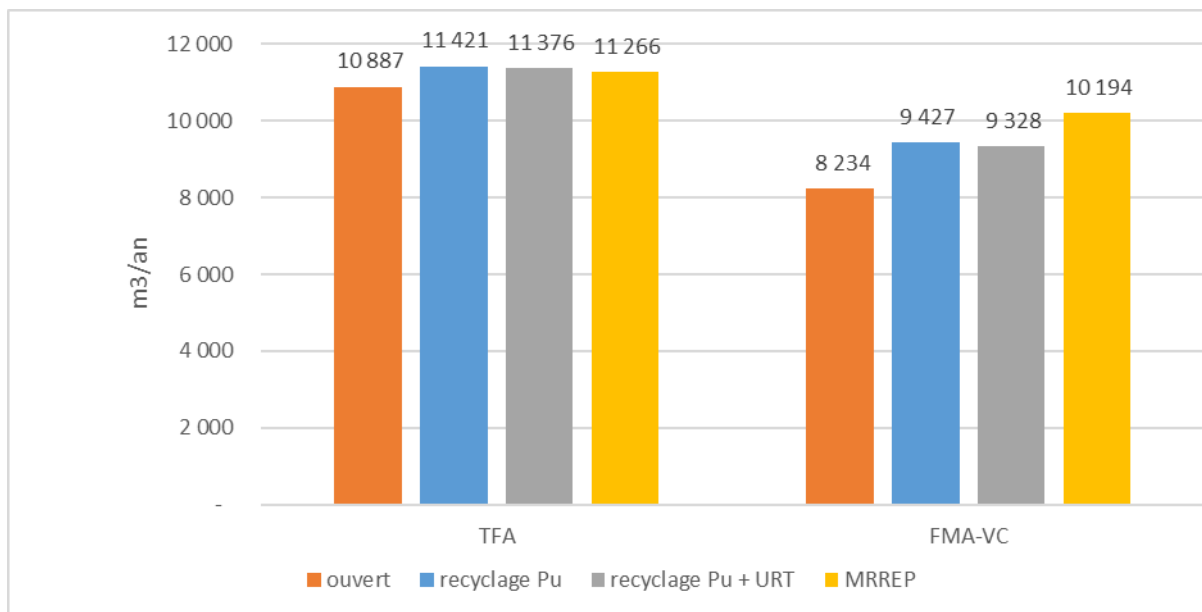
L'économie en uranium naturelle réalisée dans le cas d'une fermeture du cycle se traduit par une baisse de productions de résidus miniers (cf figure 11).

Figure 11: Variation de la production de résidus miniers (m3) en fonction de la fermeture du cycle



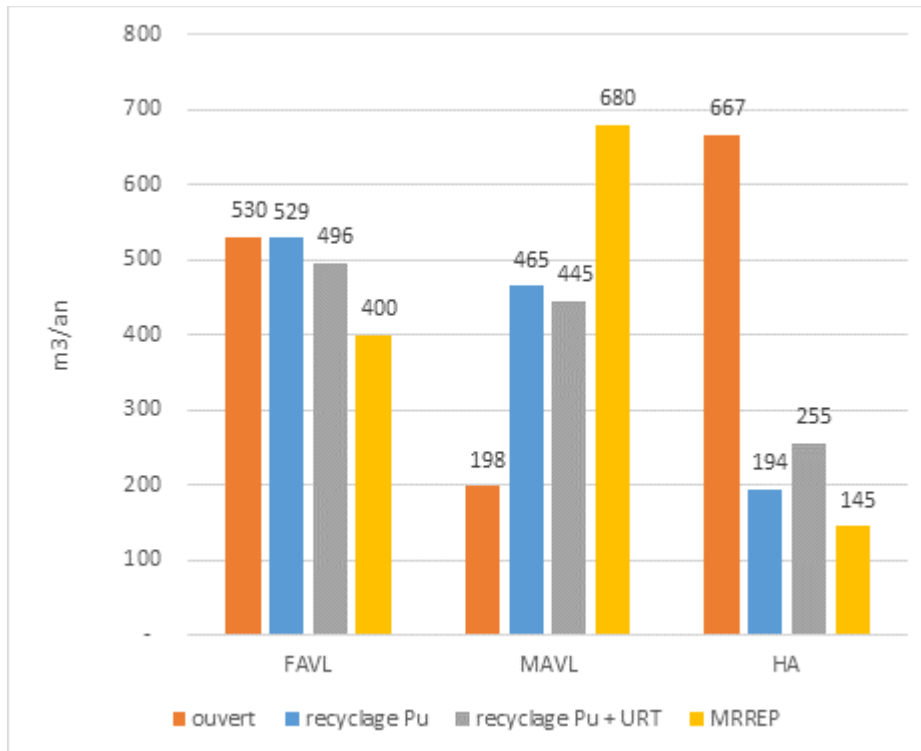
Les TFA sont très majoritairement originaires des réacteurs, par conséquent on n'observe pas de différence majeure entre les cycles. Pour les FMA-VC, bien que les réacteurs restent les principaux contributeurs, les usines de traitement ont un effet non négligeable. On remarque par exemple que le scénario de multirecyclage est le plus pénalisant, du fait d'une activité importante au traitement. De la même manière, les tonnages au traitement étant légèrement plus faibles en monorecyclage Pu+URT qu'en monorecyclage Pu, on retrouve une production de FMA-VC plus faible en monorecyclage Pu+URT.

Figure 12: Flux annuels des catégories de déchets TFA et FMA-VC (m3)



Pour les déchets HA, un regroupement a été effectué entre les colis CSD-V et les combustibles usés (cf. Figure 11). Le volume des déchets HA diminue ainsi avec le degré de fermeture du cycle. En revanche, on observe la mécanique inverse pour les MA-VL, qui augmentent à mesure que le cycle se ferme. En effet, bien que le démantèlement des réacteurs et des piscines d'entreposage contribue à la production de MA-VL, ce sont d'abord les activités de traitement qui sont les plus productrices de ces déchets, à l'image du scénario de multirecyclage. La baisse de MA-VL entre monorecyclage Pu et monorecyclage Pu+URT s'explique de la même manière que pour les FMA-VC : la légère réduction du tonnage au traitement.

Figure 13: Flux annuels des catégories de déchets FA-VL, MA-VL et HA (m3)



Les déchets FA-VL sont majoritairement issus de la phase de démantèlement de l'usine de Malvési. Les diminutions de l'activité de conversion permises par le recyclage expliquent la réduction des quantités de déchets FA-VL observée à mesure que le cycle se ferme. Cette diminution reste faible, car compensée en partie par les activités de traitement. La fabrication des gaines de zirconium est aussi un contributeur important, mais reste stable entre les différents cycles.

A noter qu'au regard des hypothèses retenues, les quantités de déchets MA-VL ci-après estimées représentent une estimation haute par rapport à la réalité⁵.

Enfin, un dernier tableau permet de visualiser les gains en volume de chaque catégorie de déchets par rapport au cycle actuel qui constitue la référence

⁵ Les hypothèses retenues dans le cadre de la modélisation sont pénalisantes. Par exemple le procédé de traitement des effluents URT retenu pour la modélisation est celui de la vitrification (procédé russe) lequel impacte le volume de déchets produits à la hausse en comparaison à un procédé de cimentation.

Tableau 14: Ecart relatifs entre cycles pour les volumes de déchets bruts

	Cycle ouvert/ monorecyclage Pu	Cycle recyclage Pu et URT/ monorecyclage Pu	Cycle multirecyclage/ monorecyclage Pu
Résidus miniers	12%	-8%	-43%
TFA	-5%	0%	-1%
FMA-VC	-13%	-1%	8%
FA-VL	0%	-6%	-24%
MA-VL	-57%	-4%	46%
HA	244%	31%	-25%

6. SYNTHÈSE DES RESULTATS POUR LES QUATRE SCENARIOS

Cette étude comparative d'évaluation environnementale vise à fournir une description détaillée des quatre cycles pour un futur parc nucléaire à l'équilibre, comprenant 40 GWe (24 EPR2).

Globalement, **la majorité des indicateurs environnementaux s'améliore avec le niveau de fermeture du cycle**. Par rapport à un cycle ouvert, cette amélioration est modérée dans les cycles de monorecyclage et nettement plus prononcée dans le cycle de multirecyclage Pu+URT. L'amélioration des indicateurs avec le degré de fermeture du cycle s'explique en grande partie par la réduction des activités minières permises par le traitement-recyclage. Le multirecyclage étant le cycle le plus poussé dans ce domaine, il ressort globalement comme moins impactant que les autres alternatives. Quant aux cycles de monorecyclage; Pu et Pu + URT, ils ont des impacts très voisins, du fait que le recyclage de l'URT ne concerne que 10% du flux d'uranium naturel nécessaire au cycle.

Ces résultats sont notamment observables sur les trois indicateurs les plus robustes : « *changement climatique* », « *particules fines* » et « *appauvrissement de la couche d'ozone* », pour lesquels le multirecyclage se démarque assez nettement.

L'estimation telle que réalisée des volumes de déchets radiologiques montre une situation contrastée. D'une part, les catégories de FA-VL et HA diminuent en allant vers un cycle davantage fermé. Cette baisse est particulièrement flagrante sur les HA, conséquence directe du traitement qui permet de séparer et conditionner en CSD-V les éléments les plus radiotoxiques ; le gain étant le plus significatif pour le multirecyclage. D'autre part la tendance inverse est observée sur les FMA-VC et MA-VL dont la production augmente avec l'intensité du traitement, particulièrement dans le cas des MA-VL avec la production de CSD-C. Les TFA, eux, restent globalement constants, dépendants d'abord des réacteurs. Concernant les résidus miniers, ces derniers baissent considérablement avec la fermeture du cycle, en corolaire des économies d'uranium associées.

7. ANNEXES

ANNEXE 1 : Présentation de l’outil modélisation

Présentation du logiciel du commerce GaBi

Le logiciel utilisé permet de réaliser des analyses statiques de cycle de vie par calcul matriciel. Il dispose d’une base de données, où est renseignée une liste de flux. Un ensemble de méthodes d’évaluations (EF, ReCiPe, CML 2001, IMPACT2002+...) est utilisable. Ces méthodes attribuent à chaque flux un facteur de caractérisation (FC). Ainsi, à l’aide d’une méthode d’évaluation et d’un inventaire de flux, il est possible d’évaluer les impacts environnementaux potentiels d’un procédé.

Après avoir modélisé le cycle actuel avec le logiciel GaBi, une analyse comparative avec NELCAS a pu être menée à bien et expliquer que certains écarts pouvaient avoir de multiples causes [Chambolle 2022]. Par rapport à l’outil NELCAS, GaBi permet de produire des résultats selon différentes méthodes, ce qui offre la possibilité de pouvoir panacher des indicateurs. L’ensemble des résultats présentés dans cette étude utilisent la méthode préconisée par la communauté européenne c’est-à-dire EF (Environmental Footprint).

Application à la modélisation des cycles nucléaires

Le cycle du combustible nucléaire a fait l’objet de quatre modélisations représentées par 4 schémas. Pour chaque schéma, il est nécessaire de régler certains paramètres globaux (paramètres utilisés par les usines). Il s’agit du monorecyclage de l’U ou non, de la répartition des réacteurs selon la nature du combustible (UOX, MOX, URE) et du nombre de piscines utilisées pour l’entreposage des CU.

La modélisation des quatre scénarii sous le logiciel GaBi avec 24 réacteurs en service pour une production de 288 TWh a donné les bilans de matière représentés dans les schémas du début du document.

ANNEXE 2 : Niveaux de robustesse des indicateurs selon la méthode PEF [EU 2021, p 353]

EF Impact category	Impact category Indicator	Unit	Characterization model	Robustness
Climate change, total ¹¹⁷	Global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ eq	Bern model - Global Warming Potentials (GWP) over a 100 year time horizon (based on IPCC 2013)	I
Ozone depletion	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	EDIP model based on the ODPs of the World Meteorological Organisation (WMO) over an infinite time horizon (WMO 2014 + integrations)	I
Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTU _h)	CTUh	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTU _h)	CTUh	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Particulate matter	Impact on human health	disease incidence	PM model (Fantke et al., 2016 in UNEP 2016)	I
Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U ²³⁵	kBq U ²³⁵ eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Photochemical ozone formation, human health	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe 2008	II
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H ⁺ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as applied in ReCiPe	II
Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as applied in ReCiPe	II
Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTU _e)	CTUe	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Land use ¹¹⁸	Soil quality index ¹¹⁹	Dimensionless (pt)	Soil quality index based on LANCA model (De Laurentiis et al. 2019) and on the LANCA CF version 2.5 (Horn and Maier, 2018)	III
Water use	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m ³ water eq of deprived water	Available Water Remaining (AWARE) model (Boulay et al., 2018; UNEP 2016)	III



Resource use¹²⁰, minerals and metals	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb _{eq}	van Oers et al., 2002 as in CML 2002 method, v.4.8	III
Resource use, fossils	Abiotic resource depletion – fossil fuels (ADP-fossil) ¹²¹	MJ	van Oers et al., 2002 as in CML 2002 method, v.4.8	III

ANNEXE 3 : Hypothèses retenues

Le grand nombre d'installations concernées par le cycle électronucléaire, la diversité des types de données nécessaires (intrants*, extrants*) et le manque de certaines données nécessitent de formuler des hypothèses et des choix, qu'il convient de présenter et de tracer.

Ces choix sont détaillés dans les paragraphes suivants.

Le tableau ci-dessous liste les hypothèses non prises en compte dans cette modélisation.

Synthèse des hypothèses non prises en compte dans la modélisation

Usine/installation	Justificatif	Commentaires
Mine souterraine riche en U (Canada)	Pas d'inventaire suffisamment précis disponible actuellement	Conservation de l'inventaire de Cominak (Niger – mine souterraine), fermée en 2021
Envolement des poussières depuis les stockages de résidus de traitement du minerai	Inventaire reposant sur des campagnes de mesures ponctuelles	Non pris en compte actuellement
Stockage des déchets conventionnels (ex : fluorines ...)	Déchets non nucléaires, stockés en centre de stockages conventionnels	Non pris en compte actuellement
Recyclage des boues de KDU, issues du nettoyage des conteneurs d'UF ₆	Non pris en compte car faible flux de recyclage matière	Faible activité et très faible impact estimé (consommation HNO ₃)
Atelier de maintenance des conteneurs d'UF ₆	Pas d'inventaire détaillé	Non pris en compte actuellement
Filière Zr	Pas d'inventaire disponible actuellement	Une étude a montré que le chrome n'est pas un bon substitut du Zr et ne couvre pas l'ensemble des transformations. Hypothèse CEA retenue (arbitraire) : on considère 4 fois l'impact de la fabrication de ferrochrome.
Stockage déchets FA-VL	Future installation Andra en sub-surface, à l'état de concept	Interface nécessaire avec l'Andra, à initier
Sous-cycle URT	Inventaires inspirés de ceux des structures de Comurhex Pierrelatte, fermées dans les années 2000	Prise en compte d'une vitrification pour la stabilisation des effluents URT
Démantèlement des installations	Sujet complexe de par la diversité des usines et des scénarios de démantèlement	Hypothèse CEA (arbitraire) : Energie de déconstruction = celle de construction. Interface avec Orano sur la consommation de réactifs liée à la mise à l'arrêt définitif

1.1 FLUX DE MATIERE DE L'AMONT

1.1.1 Types de combustible et implantation des réacteurs EPR2

Les bilans de matière en uranium et plutonium permettent de calculer le nombre de réacteurs fonctionnant avec les différents types de combustibles, pour le parc considéré de 24 EPR2 à l'équilibre.

Tableau 1 : Nombre de réacteurs fonctionnant pour chaque type de combustible selon les différents cycles

Type de combustible	Cycle ouvert	Cycle avec monorecyclage Pu	Cycle avec monorecyclage Pu + URT	Cycles avec multirecyclage Pu et URT
UNE	24	16	15	5
MOX		8	7	14
URE			2	5

Le lieu d'implantation des réacteurs a une importance en ACV. En effet, le mode de refroidissement des réacteurs est important pour la consommation d'eau et le modèle développé intègre cette disposition, à savoir un circuit ouvert pour les réacteurs en bord de mer ou le long des grands fleuves, ou un circuit fermé équipé d'aéroréfrigérant (échangeur air-eau) qui comporte une certaine évaporation d'eau et donc une consommation effective d'eau à court terme.

Parmi les 24 réacteurs du parc EPR2, EDF propose l'hypothèse de 12 fluviaux et 12 maritimes. Par souci de simplification, et en accord avec EDF, la modélisation a pris en compte les hypothèses suivantes :

- tous les réacteurs fluviaux sont équipés d'aéroréfrigérant (un par réacteur) pour limiter l'impact lié au prélèvement d'eau (eau de refroidissement totalement restituée) ;
- les réacteurs fonctionnant avec du combustible MOX ou URE ont tous été positionnés en bord de fleuve (refroidis par un aéroréfrigérant).

Les transports ayant un impact environnemental négligeable comparé aux autres étapes (construction fonctionnement, démantèlement), les hypothèses de transports du parc actuel (génération 2) ont été conservées à l'identique. Par ailleurs, il y a de fortes probabilités que les sites de production soient déjà les sites actuels.

Les autres hypothèses retenues pour le parc GEN3 sont les suivantes :

- Taux de combustion des combustibles irradiés : 52 GWj/tmli ;
- Facteur de charge annuel moyen du parc d'EPR2 : 0,83, conduisant à une production électrique de 288 TWh/an ;
- Taux d'enrichissement : 4,2% en U235 pour les combustibles UNE, 4,98% pour les combustibles URE ;
- Taux d'appauvrissement : 0,25% en U235 dans tous les cas.

1.2 FLUX DE MATIERE DE L'AVAL

Selon les 4 cycles considérés, tout le flux annuel de combustibles UOX usés est traité et tout le plutonium qui est issu de ce traitement est consommé annuellement (équilibre des flux) dans un nombre adapté de réacteurs consommant du combustible MOX d'une part et URE d'autre part.

Le détail des entreposages de matières (magasins uranium et plutonium) n'est donc pas considéré sauf pour ce qui concerne les piscines d'entreposage de combustibles usés dont le nombre dépend directement du type de cycle, ouvert ou fermé (avec ou sans traitement), considéré.

Le cycle monorecyclage Pu + URT est quasiment à l'équilibre concernant le plutonium ; pour l'URT, l'excédent est faible ($63/546 = 11,5\%$).

1.3 USINES CONSIDEREES

1.3.1 Mines

L'activité « mines » est généralement connue comme l'activité présentant quelques-unes des émissions les plus contributrices aux indicateurs d'impact ACV. Sachant qu'il existe différents types d'extractions minières (à ciel ouvert, souterraine, lixiviation in situ), il est donc important de déterminer quels types de mines sont à considérer dans le présent exercice.

Afin de refléter au mieux la réalité de l'approvisionnement minier français, EDF a précisé que l'origine géographique de ses approvisionnements d'uranium est globalement similaire aux données figurant dans le rapport annuel [EURATOM 2016] pour les exploitants nucléaires européens.

Tableau 2 : Origine de l'uranium livré aux installations de l'Union européenne en 2015

Mining origin	Quantity (tU)	Share (%)
Niger	3 152	22.0
Canada	2 946	20.6
Russia	2 765	19.3
Kazakhstan	2 261	15.8
Australia	1 896	13.2
Namibia	504	3.5
EU	220	1.5
Re-enriched tails	212	1.5
Other	130	0.9
United States	125	0.9
Uzbekistan	115	0.8
Total	14 325	100.0

Connaissant les principaux types d'extraction minières (souterraine, ciel ouvert, ou « in situ leaching ») opérées actuellement en fonction des pays, il est alors possible de déterminer la part des différents types de mines dans l'approvisionnement EDF.

Les données environnementales nécessaires n'étant pas disponibles pour toutes les mines non-opérées par Orano, il a été décidé de représenter ces 3 types d'exploitation par des mines de même type exploitées par Orano. Une mine représentative de chacun des 3 types d'exploitations minières a été choisie (2 au Niger et 1 au Kazakhstan). Le bilan environnemental est alors calculé à partir des bilans environnementaux de ces mines représentatives, au prorata des productions d'uranium considérées.

Les flux d'uranium naturel nécessaires pour les quatre cycles sont représentés sur les Figures 1 à 4 de la note de synthèse.

Toutefois, il est à noter que, en considérant que tout l'uranium nécessaire aux besoins des réacteurs français provient du Niger et du Kazakhstan, l'impact des transports associés est probablement minimisé par rapport à des approvisionnements plus lointains, venant du Canada ou d'Australie.

Ce point pourra être abordé lors de l'étude de sensibilité, pour évaluer l'impact d'une variation de cette hypothèse sur les résultats finaux.

1.3.2 Autres usines du cycle

Pour les autres usines de l'amont du cycle, il existe plusieurs fournisseurs internationaux pour lesquelles toutes les données nécessaires à une analyse du cycle de vie ne sont pas disponibles dans le cadre de cette étude, ce qui nécessiterait une étude de sensibilité.

De façon similaire à ce qui a été fait pour les mines, les différentes usines alimentant la flotte EDF sont donc représentées par les usines actuelles d'Orano et de Framatome, sur la base de leurs données et bilans environnementaux réels disponibles. Le bilan environnemental des étapes de transformations de l'amont est ainsi réalisé à partir des données des 3 usines suivantes d'Orano et de Framatome :

- Conversion (1^{ère} étape) à Malvésii (Aude),
- Conversion (2^{ème} étape) et enrichissement à Pierrelatte (site du Tricastin),
- Fabrication des combustibles à Romans.

Cette question d'accès aux données nécessaires à l'ACV ne se pose pas pour les usines de l'aval du cycle pour lequel les usines Orano de La Hague et MELOX sont seuls fournisseurs de traitement-recyclage pour EDF.

D'autres installations industrielles, jugées indispensables au cycle de l'uranium, sont également prises en compte dans l'ACV pour représenter fidèlement l'ensemble des installations du cycle (défluoration de l'UF₆ appauvri à l'usine W, gestion des effluents des usines de Pierrelatte sur Socatri, fabrication de l'UO₂ appauvri pour alimenter l'usine MOX, ...).

1.3.3 Energie produite par les réacteurs

Le parc de 40 GWe de réacteurs EPR2 est considéré fonctionner avec un facteur de charge moyen de 0,83, ce qui conduit à une production totale d'électricité de 288 TWh/an.

1.3.4 Durée de vie des usines

Une étude ACV étant globale (de la phase de construction d'une installation jusqu'au démantèlement et à l'élimination des déchets), elle nécessite de considérer que l'ensemble des impacts de l'installation, y compris l'approvisionnement en matériaux de construction et l'énergie dépensée pour construire les installations, est réparti sur la durée de vie de l'usine, c'est-à-dire sur sa période de fonctionnement. Concernant la durée de vie des réacteurs, la réglementation française ne fixe pas de durée de vie maximale. EDF doit faire valider tous les 10 ans une autorisation d'exploitation délivrée par l'ASN après une visite approfondie des installations.

Dans le cadre de cette étude nous avons considéré une durée de vie moyenne des réacteurs de 60 ans, valeur nominale pour les EPR, avec l'hypothèse que les usines du cycle devront s'adapter à la durée de vie des réacteurs. Par ailleurs, toutes les usines Orano du cycle font l'objet d'investissements industriels réguliers pour maintenir leurs capacités et répondre à la demande des clients électriciens. Aussi il est retenu pour ces usines une durée de fonctionnement au moins équivalente, aussi bien pour la fabrication de combustibles neufs que pour le retraitement de combustibles usés.

Pour les stockages, une durée de vie de 100 ans a été prise en compte. Le futur stockage FA-VL n'est pas pris en compte.

1.4 MATERIAUX ET ENERGIES DE CONSTRUCTION

1.4.1 Energies de construction et consommation des matériaux

Vu la taille des installations industrielles, il a également été jugé nécessaire de ne pas négliger les énergies nécessaires à la construction des usines de l'ensemble du cycle.

Cependant, en l'absence de données industrielles pour l'ensemble des installations du cycle, il a été procédé à des estimations d'ordres de grandeur, sur la base de la taille des infrastructures respectives des bâtiments et des installations (cf. Tableau 4 ci-après).

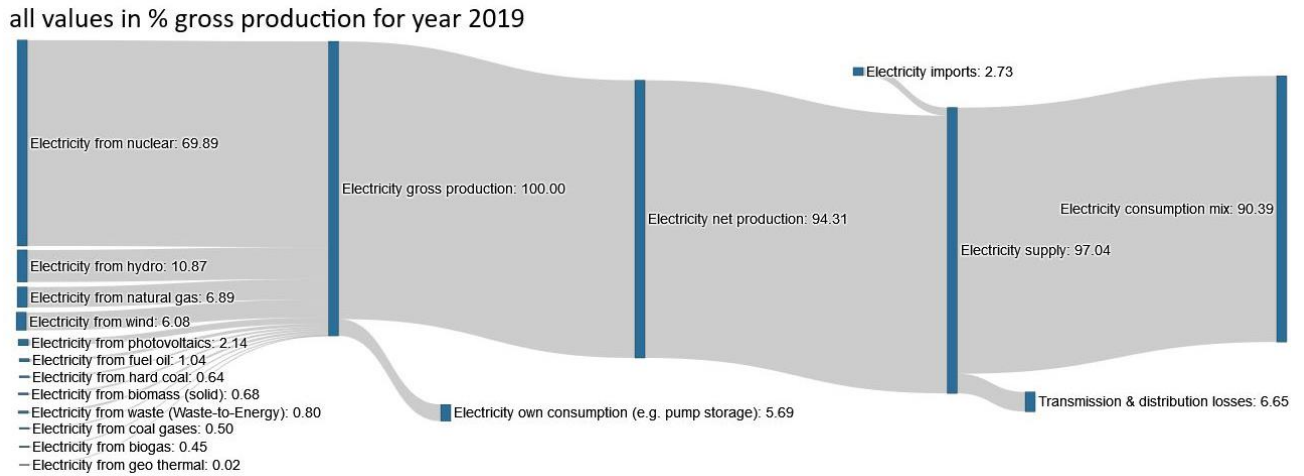
L'énergie électrique de construction considérée est pour un EPR2 de 531 000 MWh, à laquelle on ajoute un besoin de 92 500 MWh de gazole [Collectif 2018].

Pour les mines, différenciées de leur usine de traitement, et le site de stockage Cigéo, l'extension de la mine et les énergies en jeu sont comptabilisées dans le fonctionnement des installations : on n'a donc pas considéré d'énergie liée à la construction avant le démarrage du fonctionnement.

Les quantités de matériaux nécessaires à la construction d'un EPR2 sont issues de la base de données internes du CEA [CEA 2023].

1.4.2 Nature du mix électrique

Le **mix 2019** a été pris en compte pour la modélisation, à la fois pour **la construction et le fonctionnement** des réacteurs EPR2 et des usines. Il est issu de la fiche SPHERA intitulée « Electricity grid mix », France.

Figure 1 : Détail du mix électrique français en 2019 selon la fiche d'inventaire SPHERA


Il est utile de préciser qu'avec ce mix, le bilan carbone de la France en 2019 est calculé par GaBi à 74 g CO₂ eq/kWh. Cette valeur peut paraître élevée mais s'explique par un reliquat non négligeable de recours aux énergies fossiles, dont essentiellement le gaz naturel.

Pour le **démantèlement**, on considère dans un premier temps le **mix de 2030**, de façon simplifiée. En effet, chaque usine, réacteurs compris, sera démantelée durant un intervalle de temps spécifique, qui dépendra du scénario retenu. Pour les grandes installations (réacteurs, La Hague, Mélox), il est fort délicat de savoir sur quelle période sera consommée le plus d'énergie et comment se fera la répartition électricité/gazole/batteries. On peut toutefois remarquer que le mix de démantèlement aura probablement moins d'impact sur les résultats que celui de la construction (réalisée dans les années 1960-2000 selon les usines), dans la mesure où le mix français est déjà assez bien décarboné, mais qu'il reste une marge de progrès pour passer de 74 g CO₂ eq/kWh à près de 10 g CO₂ eq/kWh pour la poursuite du scénario N2 de RTE au-delà de 2050. Ce point pourra faire l'objet d'une étude de sensibilité ultérieurement.

Le mix électrique considéré pour les différents démantèlements, supposés intervenir en 2030, est détaillé dans le tableau suivant. Il correspond à une production d'électricité en France de 588 TWh/an.

Tableau 3 : Mix électrique de 2030 pour le démantèlement des installations [RTE 2021]

Energie	Gaz naturel	Nucléaire	Hydraulique	Eolien	Solaire	Biomasse
Production estimée (TWh)	42	362	62	72	46	4
Proportion	7%	62%	11%	12%	8%	1%

Ce mix, intégré dans GaBi, permet de calculer ses impacts, dont le bilan carbone associé à l'utilisation de cette électricité, qui est de **47 g CO₂ eq/kWh**.

Il convient cependant de préciser que pour les mines et leurs usines de traitement, le mix de 2019 a été conservé, à savoir slovaque pour Somair et Cominak (une analyse des fiches SPHERA de la production d'électricité à partir de lignite a montré que la fiche utilisant du lignite slovaque était proche de celle produite au Niger) et kazakh pour Katco.



Des codes couleur ont été volontairement introduits dans ce tableau, afin de conserver la traçabilité des différentes sources et montrer parfois leurs écarts. Les écarts les plus marqués concernent essentiellement les usines de conversion et de retraitement.

1.5 INVENTAIRE DES USINES EN PHASE D'EXPLOITATION

Les intrants et extrants (consommations, énergies, réactifs, effluents, déchets, ...) de toutes les usines ou ateliers du cycle ont été fournis par les exploitants pour la plupart à partir des données présentées dans les rapports annuels environnement. En l'absence de données quantifiées dans ces rapports, les estimations réalisées sont présentées dans les paragraphes suivants (cas des mines essentiellement).

Il convient de signaler qu'aucun seuil de coupure précis n'a été fixé pour la prise en compte ou non d'un réactif donné. Les principaux produits chimiques et ceux essentiels à la transformation de la matière ou au fonctionnement sûr (au sens de la sûreté nucléaire) des installations ont été déclarés par les exploitants ; ils sont souvent utilisés en quantités supérieures à 1 t/an. La diversité des produits chimiques utilisés sur les sites pouvant être parfois très importante, d'autres réactifs, utilisés en plus faibles quantités (réactifs de laboratoire, autres usages, ...), ne sont pas pris en considération dans le cadre d'une étude de ce niveau de détail.

Mine et usine SOMAÏR

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs						Eau Consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Electricité	H2SO4 (t)	NH4NO3 (t)	Carbonate (t)	Explosif (t)	NaOH (t)	Keroil (t)	m ³	ha
	t	m3	m3	m3	MWh	t	t	t	t	t	t		
2 015	2 509	566,5	189,8	19 870	32 554	112 133	838	6 285	3 807	3 682	678	2 794 549	3000

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Emissions gazeuses non radioactives				Particules	Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives
SOx	NOx	COV	Gaz appauvrissant la couche d'ozone		DND	DD	Radon
t	t	t	kg eq CFC-11	t	t	t	MBq
768	1074	774,1	49,4	141,4	1041	806	1.505e+11

Mine et usine COMINAK

Production annuelle		Surface occupée			
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	(ha)
	t	m3	m3	m3	
2 015	1 607	432,4	80,0	8572	1200

Explosifs	H2SO4	NH4NO3	NaCl	Na2CO3
t	t	t	t	t
466	53 839	1 138	4 722	1 964

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Emissions gazeuses non radioactives			Particules	Déchets conventionnels	
SOx	NOx	COV		DND	DD
t	t	t	t	t	t
492	688	223,9	20,2	351,09	190,19

Mine et usine KATCO

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs			Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gasoil	Essence	Fioul domestique	Electricité	H2SO4	NH4NO3	NH4OH 28 %	(m ³)	(ha)
	t	m3	m3	m3	MWh	t	t	t		
2 015	4 007	3 024	486	7325	91039	177 820	10 018	47 225	595 555	1100

44,4
kg/kgU

0,149
m3/kgU

Emissions gazeuses non radioactives	Déchets conventionnels	Déchets radioactifs
-------------------------------------	------------------------	---------------------

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

SOx	NOx	COV	Gaz appauvrissant la couche d'ozone	DND	DD	TFA
t	t	t	kg eq CFC-11	t	t	t
3,8	4,5	0,21401	3,41	931	58,1	532

Usine de Malvési

Production annuelle		Besoins en énergie					Réactifs				Eau prélevée	Surface occupée	
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gaz naturel	Gazole	Fioul domestique	Electricité	HNO3 28 %	NH3	HF	Isane	m ³	ha	
	t	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	t	t	t	t			
2016	9 027	65	56 754	6 000	1 960	39 643	12943	1 734	3 033	40,81	271 347	80	
	Calcul t eq CO2	15 625		1 806	625	206						30,1	
		18 263										m ³ /tU	

Emissions gazeuses non radioactives								Particules (poussières)	Effluents liquides						Déchets conventionnels	
N ₂ O	NOx	NH ₃	SO ₂	HF	HCl	COV	Isane (émission diffuse)		Nitrates	Fluor	Ammonium	Uranium	DCO	MES	DND	DD
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	
221,2	57,6	18,6	0,1	0,05	0,01	21,37	13,09	3,62	0,898	0,0256	0,029	1,83E-04	3,796	1,099	252,7	19,7

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



F
assimilé à HF

dont 31 kg
U

Déchets radioactifs
TFA
t
1 907

Ajustement de l'inventaire de Malvésí en 2023

	La Hague	Malvésí
Masse de métaux lourds traités [t]	1052	9027
Masse de TBP consommée [t]	35	300

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

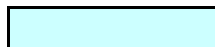
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine de conversion de Pierrelatte

Eau rejetée	Surface occupée	
Année de référence	m ³	ha
2 015	510999	15

SOx	NOx	MES	Azote Total
t	t	t	t
4,10E+00	1,44E+01	2,09E-01	2,17E-01



Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Chrome Hexavalent	Chrome Total
t	t
3,70E-04	1,10E-03

Déchets conventionnels		Déchets radioactifs
DND	DD	TFA
t	t	t
555,35	1785	158

Usine d'enrichissement GB II

Production annuelle		Besoins en énergie		Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Fioul + Gazole (t)	Electricité (MWh)	m ³	ha
	t U enrichi	t	MWh		
2 016	1200	19,51	285931	9 092	35

Emissions gazeuses non radioactives	Déchets conventionnels	Emissions gazeuses radioactives	Déchets radioactifs
-------------------------------------	------------------------	---------------------------------	---------------------

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



CFC	HF	DND	DD	Alpha	TFA
t	t	t	t	MBq	t
1,209	6,00E-04	1,28E+02	6,52E+00	3,00E-02	7,42

Remarque : les effluents radioactifs de GB II sont comptabilisés sur l'usine SOCATRI.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine SOCATRI – Pierrelatte (1/2)

Cette usine ne transforme pas d'uranium mais est associée à l'usine d'enrichissement, indispensable pour la maintenance des conteneurs, les traitements de surface et d'effluents. Pour la modélisation, sa production est considérée comme la même que celle de l'usine GB II.

Production annuelle		Besoins en énergie				Eau prélevée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Electricité	Fioul domestique	Gasoil	Essence	m ³	ha
	t	MWh	m3	m3	m3		
2 016	1200	17546	56,1	61,6	4,8	1 608 584	24

Emissions gazeuses non radioactives					Effluents liquides							
SOx	NOx	Chrome Hexavalent	Nickel	COV	Sulfates	Nitrates	Arsenic	Zinc	Uranium	Fluorures	Potassium	Fer
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
2,50E-03	9,60E-02	6,00E-05	2,31E-03	1,89E-01	5,56	3,24	4,90E-05	6,00E-05	2,12E-04	2,30E-02	6,13E+01	3,50E-03

Effluents liquides											
MES	Chlorures	Azote Total	Nitrites	Chrome Hexavalent	Chrome Total	Nickel	Oxygène DCO	Oxygène DBO5	Hydrocarbures	Cuivre	Phosphore
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
1,20E-01	5,73E+01	7,590E-01	1,86E-03	1,80E-04	3,90E-04	2,90E-04	1,67E-01	1,30E-02	1,76E-03	1,50E-04	1,70E-04

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine SOCATRI – Pierrelatte (2/2)

Déchets conventionnels		Déchets radioactifs
DND	DD	TFA
t	t	t
38,50	23,40	923,65

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine W

Production annuelle		Besoins en énergie				Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gasoil	Fioul domestique	Electricité	m ³	ha
	t U	m3	m3	m3	MWh		
2 016	10 391	10,25	5,21	14	18180	31 952	0,8

Emissions gazeuses non radioactives	Effluents liquides		Impacts évités	Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives	Déchets radioactifs
HF	Uranium	Fluor	HF 36 % *	DND	DD	Isotopes U	TFA
t	t	t	t	t	t	MBq	t
4,41E-03	1,08E-03	2,25E-01	14492	126,675	4,48	0,03733	40,56

(*) : l'usine produit de l'HF à 70 % en masse, mais une conversion est effectuée pour l'exprimer à la concentration de l'azéotrope (cf. § 4.2.3).

La consommation d'azote liquide et d'hydrogène a également été prise en compte dans l'inventaire de l'usine W. Une consommation proportionnelle à celle de l'usine de Romans a été affectée à l'usine W par rapport à la masse d'uranium traitée, à partir de calculs effectués par le CEA.

Ajustement de l'inventaire de l'usine W

Réactif ajouté	Valeur
----------------	--------

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



PNGMDR 2022- 2026

(Action POL.1)

Evaluation environnementale comparative de différents cycles du combustible électronucléaire pour un parc EPR2 de 40 GWe

Hydrogène	178101 m ³
Azote liquide	2492003 t

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Usine de Romans

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs					Eau prélevée	Surface occupée	Impacts évités
Année de référence	Production année de référence	Gaz naturel	Gasoil	Fioul domestique	Electricité	Hydrogène	Azote	Zircaloy	Acier inox	Inconel	m ³	ha	HF 35 %
	t	MWh PCI	m3	m3	MWh	m3	m3	t	t	t			t
2 016	620	9 921	16	23.39	27871	55 000	1840000	164,3	182,28	9,92	30 371	22	830

Emissions gazeuses non radioactives	Effluents liquides			Déchets conventionnels		Déchets radioactifs	
	HF	Fluorures	MES	Azote Total	DND	DD	TFA
t	t	t	t	t	t	t	t
7,90E-03	1,06E-02	7,10E-02	1,04	440	61	562	

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Réacteurs EDF : Toutes les données sont rapportées à 1 réacteur EPR2

Tableau 5 : Prélèvements et restitution d'eau des centrales actuelles [EDF 2022]

Type	Nombre de réacteurs	Part production	Prélèvement (l/kWh)	Restitution	Consommation moyenne parc (l/kWh)
Ouvert bord de mer ou estuaire (eau de mer ou eau saumâtre)	18	28 %	182	100 %	1.3
Ouvert fleuve (eau douce)	12	20 %	169	99,8 %	
Fermé rivière (eau douce)	28	52 %	10	77 %	

Synthèse des rejets liquides	Masse (kg/an)
Cu	0.85
Al	11.25
Cr	0.405
Fe	29
Pb	0.17
Ni	0.415
Mn	2.65
Ti	0.305
Zn	4.65
SO4	3720041
Cl-	101597

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



NO3	24510
NO2	370
NH4	2185.5
N	9500
PO4	250
Na	59317
MES	303
AOX (Adsorbable Organic Halogen as Cl)	140
Acide borique	5000
Acide fluoborique HBF4	7665
COT (carbone organique total)	253
DCO (demande chimique en oxygène)	759
Diéthanolamine	12
Hydrazine (N2H4)	0.505
Morpholine	12.8

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine de retraitement de La Hague (1/3)

Production annuelle		Besoins en énergie						Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Propane	Gasoil	Fioul lourd	Fioul domestique	Essence	Electricité	m ³	ha
	t ML	MWh	m3	t	t	t	MWh		
2 016	1 052	21,9	69,2	16 718	950,29	31,744	474494	474823	147

Réactifs								
NaOH 30 %	HNO3 60 %	NaNO2	Fritte de verre	Nitrate d'hydroxylamine	Hydrazine pure	Na2CO3	TBP	TPH
t	t	t	t	t	t	t	t	t
5 344	3593,82	865	314	266	38.85	49	35	23

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine de retraitement de La Hague (2/3)

Emissions gazeuses non radioactives		Particules	Effluents liquides			
Protoxyde d'azote	CO	Poussières	TBP	Nitrates	Nitrite	Hydrazine
t	t	t	t	t	t	t
114	1,7	4,93	1,26	2060	35,8	0,00441

Effluents liquides									
Cobalt	Baryum	Fer	Nickel	Soufre	Potassium	Aluminium	Chrome	Plomb	Zirconium
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
0,00169	0,0156	0,0602	0,00603	5,41	1,79	0,0775	0,0025	0,00366	0,00149

Effluents liquides								
Manganèse	Cadmium	Hydrocarbures	Phosphore	Fluorure	DCO	Zinc	Ammonium	Mercure
t	t	t	t	t	t	t	t	t
0,0196	0,000664	0,191	0,144	0,00545	14,3	0,0225	0,0289	0,00024

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine de retraitement de La Hague (3/3)

Déchets conventionnels	
DND	DD
t	t
2360	570

Déchets radioactifs							
TFA		FMA VC		MA VL (CSD-C)		HA	
m3	t	m3	t	m3	t	m3	t
1,26E+03		1,12E+03		468			339,2

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine TU5 (conversion URT)

Production annuelle		Besoins en énergie	Eau consommée	Surface occupée	Gasoil	Fuel domestique	Essence
Année de référence	Production année de référence	Electricité	m ³	ha			
	t U	MWh			m3	m3	m3
2 016	1 087	12862	1 866	0,2666	5,21	14	0,4

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Usine MELOX

Production annuelle		Besoins en énergie				Réactifs			Eau consommée	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Gazole	Fuel	Essence	Electricité	Zircaloy	Stérate de Zinc	Porogène (AZB)	m ³	ha
	t ML	m3	m3	m3	MWh	kg	kg	kg		
2 016	124	7,986	473	0,692	35671	26 884	327	437	15 474	5

conversion en MWh 80,38 5493 6,108

<https://www.abraxasenergy.com/energy-resources/toolbox/conversion-calculators/energy/>

source :

Effluents liquides				Déchets conventionnels		Déchets radioactifs					
Sulfates	Chlorures	Sodium	Fluorures	DND	DD	TFA		FMA VC		MA VL	
t	t	t	t	t	t	m3	t	m3	t	m3	t
1,60E-03	9,00E-04	3,50E-03	5,00E-04	188	33		35		118		60

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Stockage ANDRA TFA (CIRES) – Morvilliers (Aube)

Production annuelle		Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	
	m3	ha
2 016	25 320	18

Emissions gazeuses radioactives				
Tritium	C14	Iodes	Bêta Gamma	Alpha
MBq	MBq	MBq	MBq	MBq
56,6	31,7	9,09E-03	2,30E-04	1,11E-03

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Stockage ANDRA FMA-VC de l'Aube – CSA (Soulaines)

Production annuelle		Autres émissions de CO2	Surface occupée
Année de référence	Production année de référence	Mortier de ciment (à l'injection)	
	m3	t	ha
2 016	11 496	3542,4 (calcul CEA)	30

9188 colis

Mortier : 632 caissons de 5 m³ et 53 caissons de 10 m³, avec 80 % de taux d'enrobage

Déchets conventionnels		Emissions gazeuses radioactives					Rejets liquides radioactifs			
DND	DD	Tritium	C14	Iodes	Bêta Gamma	Alpha	Tritium	C14	Bêta Gamma	Alpha
m3	m3	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq	MBq
1865,19	55,71	100	53	0,066	0,015	6,70E-04	0,34	0,22	0,12	0,0031

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



Emissions radiologiques des installations du cycle

Rejets radioactifs dans l'air	Somaïr (MBq/tU)	Cominak (MBq/tU)	Katco (MBq/tU)	Malvési (MBq/tU)	Pierrelatte (MBq/tU)	GBII (MBq/tU)	Socatri (MBq/tU)	Romans (MBq/tU)	W (MBq/tU)	EPR2 (MBq/TWh)	TU5 (MBq/tU)	La Hague (MBq/tU)	Mélox (MBq/tU)
H3										2.42E+10	3.04E-01	7.08E+04	
C14										1.25E+10	6.26E-01	1.82E+04	
Co58										2.16E+04			
Co60										3.79E+04			
Kr85										1.43E+10			
Sr90				4.51E-07			3.39E-06						
Zr95					1.59E-03			2.06E-04					
Tc99				2.17E-07			1.63E-06	3.19E-04					
Ru106				1.32E-07			9.92E-07						
Ag110m										9.50E+03			
Te123m										1.01E+03			
Sb125					1.21E-04								
I129												6.09E+00	
I131										7.98E+05			
I133										9.33E+03			
Xe133										1.23E+10			
Xe135										4.98E+09			
Ce144								8.45E-04					
Cs134										1.83E+04			
Cs137								2.34E-04		2.21E+04			
Pb210	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	5.64E-06			4.24E-05						
Po210	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	3.56E-04			2.68E-03						
Ra226	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	2.99E-05		2.25E-04							
Rn222	5.98E+07	5.97E+07	1.50E+05	1.22E-07		9.17E-07							
Th228				9.74E-07	3.23E-04		7.33E-06	2.31E-05	9.17E-08				
Th230	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	3.92E-04			2.95E-03						
Th234	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	6.49E-02	2.18E-04	6.88E-07	4.88E-01	8.69E-07					
Pa234m	9.53E-01	1.11E+00	5.52E-01	6.49E-02			4.88E-01						
U234	9.57E-01	1.11E+00	5.57E-01	6.71E-02	1.64E-05		5.05E-01	8.94E-05	2.42E-06				
U235	4.42E-02	5.15E-02	2.57E-02	2.98E-03	1.80E-03	1.68E-05	2.24E-02	2.31E-06	3.53E-08				
U238	9.53E-01	1.11E+00	5.52E-01	6.48E-02	1.52E-06		4.88E-01	8.69E-07	6.23E-07				
Uranium total								3.59E-06			5.43E-05		
Np237				6.57E-08			4.94E-07	1.07E-05					
Am241				6.57E-08			4.94E-07						
Pu alpha				1.89E-05	7.11E-07		1.43E-04	1.06E-03			7.08E-05	3.89E-04	7.26E-05
Radioactive emissions (general)						2.50E-04							
Radioactive species, other beta emitters											2.58E-04		
Noble gases, radioactive, unspecified												3.04E+08	

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.



PNGMDR 2022- 2026
(Action POL.1)
Evaluation environnementale comparative de différents cycles de combustible électronucléaire
pour un parc EPR2 de 40 GWe

Rejets radioactifs dans l'eau	Somaïr (MBq/tU)	Cominak (MBq/tU)	Katco (MBq/tU)	Malvésî (MBq/tU)	Pierrelatte (MBq/tU)	GBII (MBq/tU)	Socatri (MBq/tU)	Romans (MBq/tU)	W (MBq/tU)	EPR2 (MBq/TWh)	TU5 (MBq/tU)	La Hague (MBq/tU)	Mélox (MBq/tU)
H3					3.73E-03					3.33E+06	1.66E-01	1.17E+07	
C14					3.15E-02					1.63E+03	3.59E-02	7.18E+03	
Mn54										4.58E-01			
Co58										8.75E-01			
Co60										4.86E+00		5.51E+01	
Sr90				9.66E-07			7.27E-06					9.22E+01	
Zr95								1.84E-04					
Ru106				3.99E-10			3.00E-09	1.54E-03	3.64E-14			1.30E+03	
Ag110m										1.79E+00			
Te123m										4.17E-01			
Sb124										3.96E-01			
Sb125										9.83E-01			
I129												1.37E+03	
I131										3.54E-01			
Ce144								8.92E-04					
Cs134										5.83E-01		4.78E+01	
Cs137								2.26E-04		7.29E-01		6.26E+02	
Pb210				5.20E-08			3.91E-07						
Po210				3.28E-18			2.47E-17	2.06E-04					
Ra224				2.95E-09			2.22E-08						
Ra226				2.76E-07			2.08E-06						
Th228				2.95E-09			2.22E-08	2.06E-04		1.05E-01			
Th230				2.03E-06			1.53E-05						
Th234				1.99E-04	3.75E-02		1.50E-03	1.03E-02		7.12E-01			
Pa234m				1.99E-04			1.50E-03						
U234				2.07E-04	4.27E-02		1.56E-03	9.84E-02		2.76E+00			
U235				9.03E-06	1.80E-03		6.79E-05	3.55E-03		4.04E-02			
U238				1.99E-04	3.75E-02		1.50E-03	1.03E-02		7.12E-01			
Np237				1.99E-10	7.76E-04		1.50E-09	1.47E-04					
Am241				1.99E-10			1.50E-09						
Pu alpha				3.14E-09	1.55E-03		2.36E-08	9.37E-04	1.21E-09				
Radioactive species, alpha emitters											2.30E-02	2.19E+01	9.68E-04
Radioactive species, from fission and activation											7.64E-02		

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.
 Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.

1.6 HYPOTHESES POUR LA MODELISATION DU CYCLE URT

1.6.1 Elaboration d'un plan spécifique

Le scénario du cycle avec le recyclage de l'URT a nécessité de développer un nouveau plan, c'est-à-dire un modèle pour décrire les usines du sous-cycle URT.

On considère un cycle réalisé avec les mêmes procédés et installations que celles actuellement utilisées en Russie, mais **en France**, à défaut de lieu d'implantation des futures installations nécessaires en Europe (dont la France) pour une limitation des risques géopolitiques.

1.6.2 Estimation des volumes d'effluents du cycle URT

Le procédé de recyclage de l'URT actuellement en vigueur utilise une « voie humide » en amont, telle que décrite ci-dessous.

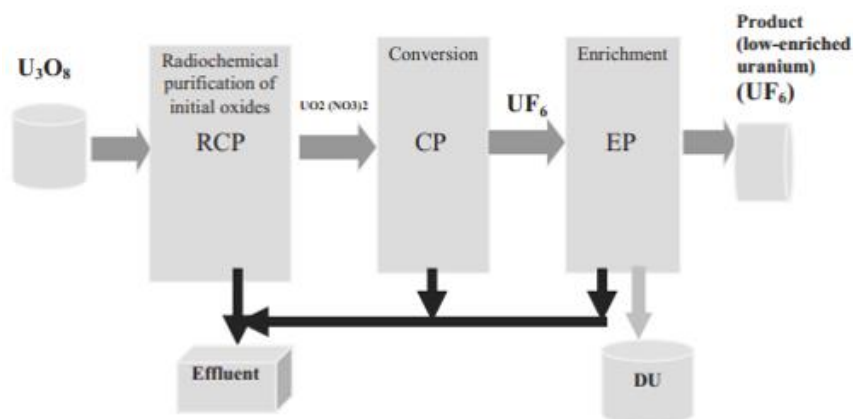


Figure 2 : Procédé de transformation de l'URT utilisé en Russie [AIEA 2009]

Dans les années 1980-1990, COGEMA devenu Areva disposait au sein de sa filiale COMURHEX à Pierrelatte d'ateliers convertissant l' U_3O_8 URT en UF_6 (structure 2000 pour la conversion en UF_4 , puis structure 2450 pour la transformation en UF_6). Ces ateliers ont été mis à l'arrêt définitif au début des années 2000. A l'époque, l'usine d'enrichissement Eurodif ne pouvait pas accepter d'URT et l' UF_6 URT était enrichi soit en Russie, soit dans l'usine Urenco d'Almelo (Pays-Bas). Ces installations ont permis à EDF de recycler du combustible URE dans 2 à 4 des réacteurs de Cruas de 1994 à 2013. Désormais, seules les installations de TENEX en Russie sont opérationnelles pour la conversion de l'URT ; par contre, l'enrichissement de l'URT peut être fait dans plusieurs installations : Russie, Urenco ou GBII. L' UF_6 enrichi issu de l'URT peut être transformé en combustible URE dans l'usine Framatome de Romans, où une des lignes lui est dédiée, sous réserve de respect de la limite haute en U232 (5 ppb/U total actuellement, demande de dérogation en cours).

Le procédé de recyclage de l'URT du futur, associé au parc EPR2, est donc supposé être implanté en France, avec les mêmes installations que le procédé russe.

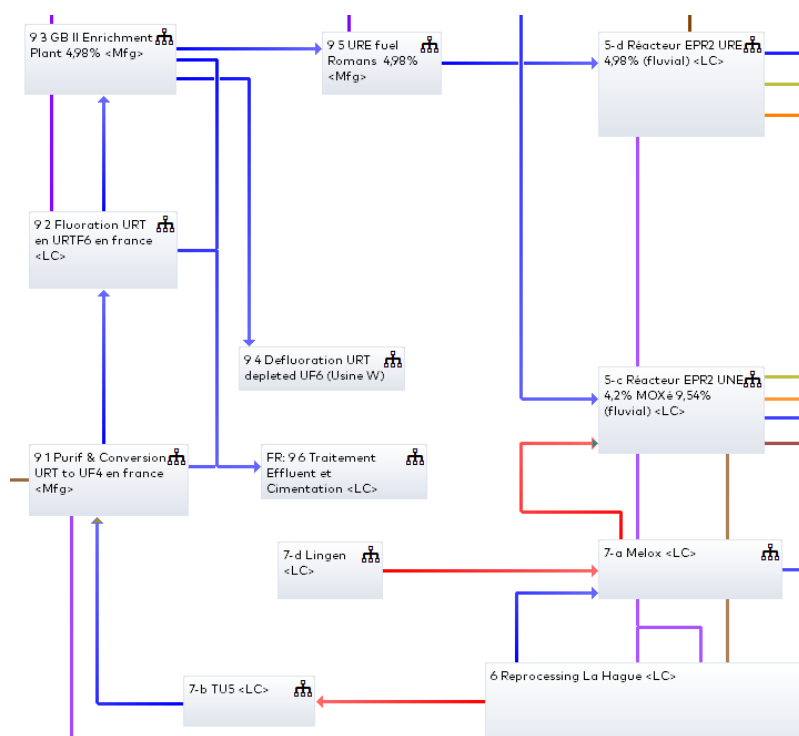
Le procédé utilisé se décompose en plusieurs étapes successives, dont la description permet de suivre les différentes composantes des effluents :

- Dissolution de l'U₃O₈ en milieu nitrique et purification au TBP, avec une variante du procédé employé à Malvési, car il s'agit d'éliminer suffisamment les descendants de l'U, dont le Th, et les traces de transuraniens et produits de fission. Les raffinats d'extraction constituent la première composante des effluents ;
- Précipitation du nitrate d'uranyle purifié à l'ammoniaque sous forme d'ADU, amenant la production d'effluents de nitrate d'ammonium ;
- Calcination de l'ADU en UO₃, réduction à l'hydrogène en UO₂ puis réaction avec l'HF anhydre pour former l'UF₄, suivie d'une seconde fluoration en UF₆ ;
- Enrichissement de l'UF₆ par ultracentrifugation à 4,98% d'U235 pour les réacteurs EPR2 alimentés en combustible URE. Les opérations de maintenance des cylindres d'UF₆ mais surtout de vidange et rinçage des pieds de cuve, générant des fonds solides irradiants, produisent des effluents nitriques chargés en ions fluorure et aluminium (ajouté pour réduire la corrosion de l'acier).

Ces trois types d'effluents sont mélangés et doivent être traités de façon à concentrer et confiner leur radioactivité. La société russe TENEX a proposé en 2018 à EDF une solution plus conforme aux standards actuels de gestion des effluents. Le procédé retenu consiste à concentrer les effluents, à les calciner puis les vitrifier. On a supposé en première approximation que les inventaires étaient les mêmes.

Le modèle développé avec l'outil GaBi est présenté sur la figure suivante.

Figure 3 : Schéma du procédé pour l'obtention du combustible URE à partir de l'URT en provenance du parc d'entreposage de Pierrelatte



Hypothèses spécifiques

Pour déterminer le flux annuel d'effluents, on prend un fonctionnement moyen de l'usine de Malvési correspondant à la conversion de 10 000 t U/an.

Tableau 6 : Constitution des effluents de la conversion et l'enrichissement de l'URT

Etape	Volume d'effluents (m ³ /an)	Hypothèses
Purification	24440	Fonctionnement continu 320 j/an
Précipitation	76920	
Lavage cylindres UF6	9	.Fonds solides : 4 kg UO ₂ F ₂ pour les « 30B » et 1 kg UO ₂ F ₂ pour les « 48Y » (URT et appauvri) . 79 cylindres « 30B » (enrichi) et 95 « 48Y » qui sont rapidement recyclés

Le spectre considéré est celui pris par Areva lors de son étude de démantèlement de l'INB 105 de Pierrelatte, installation comprenant les unités traitant l'URT [Areva 2013]. Plus précisément, le spectre pris en compte en tête de transformation sera celui de la Structure 2000.

Tableau 7 : Spectre radiologique considéré pour les effluents URT à traiter (Bq/gU)

Pu238	Np237	Cs137	Nd144	Tc99	Th228	Pb212	Th234	Pa234	Th231	Pa231
6,50E+01	1,25E+02	1,00E+01	1,00E+01	1,00E+02	1,08E+03	1,08E+03	1,20E+04	1,20E+04	2,00E+03	2,00E+03

On notera l'absence de Ru106 dans ce spectre, alors qu'il est régulièrement cité dans les impuretés de l'URT [AIEA 2009].

Le sujet est assez complexe car le procédé comporte 3 étapes incluant des transformations d'une phase liquide à une solide, ou l'inverse, avec à chaque fois une partition des radionucléides selon leur comportement chimique. Dans un premier temps, il n'a pas été tenu compte de la période des radionucléides, ne connaissant pas les durées de stockage des liquides entre les étapes. En effet, les 3 familles radioactives naturelles comportent des descendants à vie courte, qu'on peut avoir intérêt à laisser décroître pour limiter les doses intégrées par le personnel ; dans le cas de l'URT, il s'agit essentiellement des descendants de l'U232, dont surtout :

- Rn220 (T=56 s), qui pose des problèmes d'émanation dans les installations

- Tl208, qui est un émetteur gamma dur à 2,6 MeV (T=3,05 min), responsable de l'essentiel de l'irradiation.

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Compte tenu de nombreuses valeurs incertaines ou manquantes dans les facteurs de décontamination (FD) des différents radionucléides [Korotkevich 2007 ; Pu ~1000, Th > 100, Np ~100, Tc >> 40] et du fait que le degré de décontamination dépend de la conduite de la purification radiochimique (réglages fins), nous considérons que toutes les impuretés se retrouvent dans le raffinat, ce qui représente une hypothèse majorante pour la radioactivité des effluents ;
- A la seconde étape de précipitation de l'ADU, toutes les impuretés sont copécipitées à 100%, sauf le Cs137 et le Tc99, dont les FD sont pris égaux à 50 et 100 respectivement [Korotkevich 2007] ;
- Pour le rinçage des cylindres d'UF₆ comportant des fonds solides à éliminer avant de pouvoir recycler ces emballages, on considère le spectre radiologique de la structure 2450 [Areva 2013], donné ci-dessous.

Tableau 8 : Activités massiques considérées pour l'URT des fonds solides (Bq/g U)

U232	U234	U235	U236	U238	U total
1,08E+03	3,65E+04	2,00E+03	8,81E+03	1,2E+04	6,04E+04

On suppose que tous les descendants des isotopes de l'U sont à l'équilibre séculaire (soit pour les activités : U235 = Th231, U238 = Th234 = Pa234), compte tenu d'une fréquence de rotation des cylindres très aléatoire, en particulier dans le cas de l'URT avec des transports sur de longues distances. Il s'agit d'une hypothèse assez simplificatrice, en l'absence de calculs complets de décroissance pour un spectre compliqué avec un paramétrage en fonction de temps d'entreposage des cylindres vides.

En outre, on a considéré une partition du Tc99 à 90% dans la fraction enrichie puisqu'il donne un fluorure volatil et plus léger que l'UF₆, et pour le Ru106, le même rapport par rapport à l'U que dans le spectre de GBII : 330 Bq/gU.

Composition des effluents globaux

Compte tenu de la répartition des trois types d'effluents on obtient pour les effluents globaux la composition suivante :

Tableau 9 : Composition des effluents mélangés

Spectre chimique	Concentration (g/L)	Concentration (mol/L)
U	0,06	2,50E-04
NH ₄	14,9	8,28E-01
Al	0,01	3,53E-04
NO ₃	61,9	9,99E-01
F	0,007	3,53E-04

On constate que les effluents sont très dilués en uranium, mais concentrés en ions ammonium et nitrate (concentrations molaires). Il va donc falloir les concentrer fortement avant de procéder à la vitrification telle qu'envisagée par TENEX. La seule donnée communiquée par TENEX concerne le nombre de colis de verre rapporté à la masse d'URT initial traitée : en moyenne 0,015 kg verre/kg URT.

Cette donnée a permis de calculer le nombre de colis de verre, assimilés à des CSD-V et leurs caractéristiques radiologiques.

Tableau 30 : Caractéristiques des verres issus du traitement des effluents URT

Masse URT à traiter (t/an)	903
Masse de verre produite (t/an)	13
Nombre annuel de colis produits	32,8 (arrondi à 33)
Calcul masse U (kg/colis)	16,5
Activité estimée émetteurs alpha (Bq/colis)	1,05E+11

Il est intéressant de comparer l'activité de ce verre URT à celle d'un verre UOX tel que produit à l'usine de La Hague, à partir des concentrats de PF.

Tableau 11 : Caractéristiques maximales des verres UOX à La Hague

U (kg/colis)	4,5
Pu (kg/colis)	0,11
Activité alpha totale (Bq/colis)	6,20E+14

Avec les différentes hypothèses émises sur la composition des effluents URT, on obtient une activité de 2,23E+06 Bq/g de verre. Compte tenu de nombreux RN à vie courte (89% de l'activité totale), les colis de verre sont clairement à comptabiliser dans la catégorie **FA-VL**, après une période de décroissance d'une dizaine d'années (la période du Th228 est de 1,9 an).

Une estimation de la consommation énergétique a été réalisée et est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Energie nécessaire à l'étape globale de vitrification des effluents URT (MWh/t de verre)

Evaporation	Décomposition des nitrates	Vitrification	Total
524	60	500	1084



**PNMMDR 2022- 2026
(Action POL.1)**

**Evaluation environnementale comparative de différents cycles du
combustible électronucléaire pour un parc EPR2 de 40 GWe**

1.7 ÉMANATION DE RADON

1.7.1 Cas des mines

La détermination du radon total émis doit prendre en compte plusieurs composantes issues des parties suivantes de l'ensemble mine & usine :

- la mine en exploitation, qui inclut aussi souvent les étapes de concassage et broyage (préparation du minerai) ;
- l'usine de traitement, émettrice de poussières aux différents postes selon l'efficacité des dispositifs de filtration ;
- les stériles de découverte et les résidus de traitement du minerai.

Plusieurs méthodes ont été considérées pour calculer les émissions de radon : empirique (basée sur des mesures effectuées sur les mines considérées) et théorique (basée sur des coefficients établis par des études précédentes).

1.7.1.1 Méthode empirique

Orano dispose de résultats de mesures de flux de radon au-dessus des résidus de traitement qui ne sont pas couverts. Les valeurs obtenues pour les usines du Niger sont présentées dans le Tableau 43.

Tableau 43 : Emissions de radon à partir des flux au-dessus des résidus pour les usines du Niger

Usine	Flux de radon (Bq.m ⁻² .s ⁻¹)	Surface des verses à fin 2017 (ha)	Rejet annuel de Rn222 (TBq/an)
Somaïr	20	65	410
Cominak	18	65	369

Il s'agit d'un rejet annuel qui ne prend pas en compte l'augmentation progressive des résidus et leur devenir après la fin de l'exploitation.

Les quelques évaluations réalisées lors de l'exploitation des mines par Orano semblent montrer un flux annuel de radon globalement équivalent, voire supérieur, au stockage des résidus lui-même.

A Cominak, des valeurs de concentration de Rn222 ont été mesurées au niveau des cheminées des galeries de ventilation, allant de 3600 à 18000 Bq/m³ [Alhacen 2010].

Pour la mine ISL, l'estimation d'émission de radon est basée sur celle de la mine australienne de Beverley : environ 100 GBq/jour, soit un rejet de 43,4 MBq/kgU [Doka 2011]. En considérant une part supplémentaire évaluée à 20 MBq/kgU due au séchage et à la calcination, on retient pour l'usine Katco une émission de radon d'environ 254 TBq/an, pour une production en 2015 de 4007 tU.

Les résultats des émissions totales pour les 3 mines & usines modèles sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Emissions de Rn222 pour les trois mines & usines « modèles » selon la méthode empirique

Mine & usine modèle	Somaïr	Cominak	Katco
Radon total émis en 2015 (TBq/an)	820	738	254

Il est à noter que les valeurs de la littérature confirment toutes le fait que la contribution très largement prépondérante à l'émission de radon est celle des résidus [Dones 2009], permettant quasiment de négliger les autres.

1.7.1.2 Méthode théorique

[Frischknecht 2000] propose un facteur d'émission à long terme du Rn222 (80 000 ans, ordre de grandeur de la demi-vie du Th230 à 75380 ans, son « grand-père ») de $2E+9$ kBq/kgU pour des résidus miniers abandonnés, 33 fois plus élevé que pour des résidus couverts ($6E+7$ kBq/kgU). La question de la tenue d'une couverture pendant une période aussi longue dépendra probablement davantage des phénomènes d'érosion ou de déposition que de la qualité des barrières ouvragées.

Dans le cas des mines du Niger, les résidus ne sont pas couverts pendant la phase d'exploitation (environ 60 ans), mais ils le seront à la fermeture de la mine, de façon à réduire l'empreinte sur l'environnement due au radon. On serait donc amené à considérer la seconde valeur, qui est 1,7 fois plus élevée que celle prise en compte dans NELCAS 1 [Poinssot 2014] et qui correspond aux rejets résidus couverts pour la zone géographique d'Arlit, d'après le rapport Ecoinvent No. 6-VII "Kernenergie", Chapter 5.

Les rapports Ecoinvent de référence [Dones 2009] proposent des valeurs moyennes d'émission de radon pour les différents types de mines et les étapes de la transformation : 1 TBq/tU pour une mine souterraine, 0,13 TBq/tU pour une mine à ciel ouvert, 0 pour une mine ISL si les puits sont parfaitement rebouchés après la fin de leur phase de production, 0,15 TBq/tU pour la production de yellow cake et 35 TBq/tU pour les résidus de minerais.

En retenant cette valeur de $6E+7$ kBq/kgU (60 TBq/tU) pour les résidus, les deux mines du Niger ont une émission de radon assimilable à celle des résidus, qui est largement majoritaire. En prenant pour une usine de traitement la valeur de 0,15 TBq/tU, on obtiendrait alors pour les 3 mines et usines « modèles » d'Orano les valeurs suivantes. Il s'agit bien de facteurs d'émission à long terme, par année de production.

Tableau 15 : Emissions à long terme de Rn222 pour les trois mines et usines « modèles »

	Somaïr	Cominak	Katco
Emission de radon unitaire (MBq/tU)	6,0E+7	6,0E+7	1,5E+5
Emission totale de radon à long terme (TBq/année de production)	151 000	96 400	601

Les valeurs obtenues avec cette méthode sont supérieures d'un facteur 2,4 pour Katco à près de 200 pour Somaïr par rapport à la méthode empirique décrite en 3.6.1.1., méthode empirique qui, basée sur les rejets actuels mesurés, ne considère pas les émissions au-delà de la vie de la mine. L'écart est relativement faible pour une mine ISL telle que Katco, qui ne produit pas de résidus, et se révèle être beaucoup plus important pour les autres types de mine.

Ce sont ces valeurs englobant l'effet à long terme des résidus miniers qui seront prises en compte pour les calculs de l'ACV.

1.7.2 Cas de Malvésí

Une estimation du radon émis par les résidus de traitement de conversion de l'uranium (RTCU), entreposés au niveau de bassins spécifiques sur le site de Malvésí, a été entreprise [Collectif 2018]. On retient pour l'émission de Rn222 une valeur de 2,02E+06 MBq/an.

1.8 REJETS CHIMIQUES DES MINES

1.8.1 Prise en compte des rejets chimiques et radioactifs liquides et radioactifs gazeux de l'année 2019 par type et zone géographique des réacteurs

Dans la majorité des cas, les réacteurs en bord de fleuve disposent d'aéroréfrigérant(s), alors que ceux en bord de mer n'en disposent pas. Pour le modèle actuel, il a été choisi de prendre les données d'inventaire publiées par EDF dans son étude ACV récente [EDF 2022]. Comme la répartition des réacteurs dans le modèle GaBi est faite sur la base de la nature du combustible, il a fallu ajuster les consommations d'eau pour ces groupes de réacteurs.

1.8.2 Rejets liquides

Ils comprennent les eaux d'exhaure pompées des mines, qui sont traitées pour réduire leur concentration en U et Ra226 avant rejet, et les effluents de lixiviation des résidus de traitement par ruissellement des eaux pluviales.

Au Niger, ces effluents ainsi que ceux récupérés lors des rares pluies sont dirigés vers des bassins d'épandage et d'évaporation qui s'assèchent rapidement compte tenu de la météorologie au Sahara. Ce mode de gestion par concentration / évaporation a été retenu comme le plus adapté localement, en l'absence de réseau hydrologique local (rivières ou fleuves).

Il n'y a donc pas de rejets liquides dans le milieu naturel récepteur, à l'image de la dispersion d'un rejet d'effluents liquides après traitement, dans un grand cours d'eau. Toutefois, les résidus de traitement n'ayant pas tous été historiquement isolés du sol par des géomembranes comme actuellement, on ne peut exclure que des infiltrations puissent se produire vers le sous-sol, entraînant un risque de marquage chimique et radiologique des nappes à terme. Cette problématique fait d'ailleurs l'objet d'une surveillance environnementale locale adaptée.

Pour l'instant, aucun rejet liquide n'est considéré depuis les mines, reposant sur le mode de gestion actuel des mines du Niger.

Pour une mine ISL, la problématique est différente car elle présente l'avantage de ne pas produire de résidus de traitement en surface, mais aussi l'inconvénient d'injecter dans le réseau géologique souterrain des solutions acides, dont une fraction ne pourra pas être récupérée. Pour les puits du site de Katco, Orano annonce un taux de fuite moyen de 10 % de la quantité introduite (soit 17782 t/an). Le transfert de polluants en sub-surface n'est actuellement pas bien pris en compte dans les logiciels d'ACV qui ne considèrent que les compartiments eau de surface, air et sol. Les fuites d'acide sulfurique n'ont donc pas été prises en compte à date, mais ce point mérite un approfondissement à court terme pour affiner le modèle.

1.8.3 Rejets de poussières atmosphériques

Les données disponibles sur les rejets des installations Orano du Niger présentent la composition d'un certain nombre de métaux lourds dans les poussières atmosphériques émises, comprenant à la fois les rejets canalisés vers les cheminées et les rejets diffus.

Tableau 16 : Masse de poussières et polluants émis par les mines & usines d'uranium nigériennes (t/an)

Usine	Poussières totales (PM10)	Poussières hors métaux analysés	U	Pb	As	Mo	Zr	Fe	V
Cominak	20,2	19,3	0,141	0,693	1,39E-03	6,69E-03	1,11E-02		3,31E-02
Somaïr	141,4	138,4	0,1897	2,01	4,04E-04	6,26E-03	4,76E-03	7,79E-01	

Les poussières globales interviennent dans la catégorie « respiratory inorganics » qui n'est pas considérée dans le cadre de cette étude en raison d'un manque de données homogènes pour l'ensemble des usines. Elles seront toutefois prises en compte par une simple somme pour les usines qui en ont déclarées.

1.9 TRANSPORTS

1.9.1 Transport des matières nucléaires et déchets

Tous les transports inter-usines des flux d'uranium sont considérés dans le modèle. 3 types de transports sont utilisés à savoir le transport ferroviaire, routier et maritime. En amont des réacteurs, on attribue l'impact du transport à l'usine N+1. En aval des réacteurs, on attribue l'impact du transport à l'usine N-1. Ceci revient à dire que ce sont bien les réacteurs qui sont responsables de ces flux, et qu'ils n'existeraient pas en leur absence.

Les distances pour le transport routier entre les usines sont calculées à l'aide de Google Maps. Le taux d'occupation des camions est toujours fixé à 100%, puisqu'il s'agit de transports dédiés aux flux d'uranium. Les distances parcourues en avion et bateau sont estimées par le CEA, et regroupées dans un tableau. Les technologies utilisées pour les usines françaises sont les suivantes :

Tableau 57 : Transports utilisés pour les usines françaises

Type de transport	Fiche procédé
Camions	GLO : Truck Euro 6 28-32t gross weight / 22t payload
	GLO : Truck Trailer Euro 6 50-60t gross weight / 40,6t payload
Train	GLO : Rail transport cargo-average, extra large train, gross tonne weight 2000t/ 1452t payload

Les fiches procédés utilisées pour le transport du yellow cake des mines jusqu'à Malvési utilisent les fiches procédés suivantes.

Tableau 68 : Transports utilisés pour les mines

Type de transport	Fiche procédé
Camions	GLO : Truck Euro 3 28-32t gross weight / 22t payload
Train	GLO : Rail transport cargo-average, extra large train, gross tonne weight 1000t/ 726t payload
Bateau	GLO : Container ship, 5000 to 200 000 t

1.9.2 Transport des matériaux de construction, déchets de démantèlement et réactifs

Compte tenu de l'indisponibilité de données consolidées liées à des transports passés (matériaux de construction des usines) ou futurs (matériaux issus des futurs démantèlements), le groupe de pilotage a décidé de ne pas prendre en compte les transports associés à ces opérations.

Il en est de même pour les réactifs, pour lesquels les transports jusqu'aux usines concernées dépendent du choix des fournisseurs, fluctuant dans le temps, et plus généralement des politiques « achats » des acteurs industriels.

Il est cependant possible de justifier que les transports associés à ces opérations seraient semblables pour les deux cycles considérés, ouvert ou actuel, sauf pour les étapes de l'amont du cycle pour lesquelles les besoins en uranium naturel, donc en réactifs de transformation également, sont plus élevés pour le cycle ouvert (+ 10 % en besoin annuel d'uranium). Ce n'est en revanche pas le cas pour l'aval du cycle qui ne concerne que le cycle actuel.

Ce point pourra être affiné ultérieurement si l'impact de ces transports devait avoir une contribution importante au final.

1.10 ENTREPOSAGES

1.10.1 Nombre de piscines d'entreposage des combustibles usés

Pour réaliser une ACV à l'équilibre il convient de tenir compte de toutes les installations nécessaires au bon fonctionnement des cycles étudiés. En particulier, pour les combustibles usés non retraités, il faut prévoir un nombre suffisant de piscines d'entreposage pour permettre un refroidissement correct des combustibles avant de pouvoir les transférer à CIGEO en respectant les contraintes thermiques de la roche hôte en profondeur.

Le seul paramètre utilisé ici est la durée de refroidissement des combustibles usés préconisée par l'Andra et que l'on retrouve dans la littérature ouverte [Machiels 2010] : 80 ans pour les UNE et URE, 150 ans pour les MOX.

La référence retenue correspond au dernier standard d'Orano, à savoir la piscine E de La Hague, d'une capacité de 5000 tml.ii.

Tableau 19 : Calcul du nombre de piscines pour l'entreposage des combustibles usés non retraités

Flux de CU (tml.ii/an)	Cycle ouvert	Cycle avec monorecyclage Pu	Cycle avec monorecyclage Pu + URT	Cycle multirecyclage Pu + URT
Combustibles usés				
UOX	672			
MOX ou MR		74,6	65,3	0
URE			56,0	0
Masse de combustible usé accumulé en fin de refroidissement (tml.ii)	53 760	< 11 190	14275	0

Nombre de piscines nécessaires à l'équilibre	11	2	3	0
--	-----------	----------	----------	----------

Par rapport aux cycles avec traitement/recyclage, on constate que le cycle ouvert nécessite un nombre très important de piscines, justifié par le fait que tous les combustibles usés non traités seraient stockés, après refroidissement, à CIGEO, saturant assez rapidement ce stockage.

1.10.2 Entreposages d'uranium appauvri et de retraitement

Les entreposages de combustibles usés, de déchets issus de retraitement et de matières valorisables (U appauvri, URT) ont été considérés uniquement du point de vue de leur emprise, à défaut de connaître précisément les inventaires de réactifs et d'énergie associés, souvent indissociables des bilans des usines dans lesquelles ils sont situés. En suivant les préconisations de la norme ISO 14040, cet inventaire sera approfondi si l'impact de certains de ces entreposages s'avère conséquent.

Tableau 20 : Données de base pour les entreposages (1/2)

Masse maximale de CU UOX ou MOX (tML/piscine)	5000
Nombre de colis CSD-V par module	4320
Nombre de colis CSD-C par module	24000
Surface unitaire d'entreposage U appauvri DV70 (m ² /tU)	0,274
Surface unitaire d'entreposage URT en fût (m ² /tU)	2,452

La surface unitaire effective d'entreposage plus de 5 fois plus élevée pour l'URT que pour l'uranium appauvri s'explique par le fait que l'URT, pour lequel il est aujourd'hui prévu un recyclage dans les REP, n'est pas compacté et qu'il est conditionné en fûts cylindriques de 200 L, alors que l'uranium appauvri l'est dans des conteneurs parallélépipédiques DV70 de 3,3 m³.

Tableau 21 : Données de base pour les entreposages (2/2)

Type de produit	Surface unitaire entreposage (m ²)	Installation de référence	Durée minimale de refroidissement (ans)
Combustibles usés UOX	1840	piscine E La Hague	80
Combustibles usés MOX	1840		150
CSD-V	960	alvéole 30 atelier EEV La Hague	80
CSD-C	2800	atelier ECC La Hague	10 (colis non thermique) mais uniformisé à 80
U appauvri	2,735 par conteneur DV70	P35, P17, P18, P19 Pierrelatte et Bessines	
URT	0,5 par fût	P35, P17, P18 Pierrelatte	

L'uranium appauvri et de retraitement sont des matières valorisables qui sont entreposées en attente de réutilisation : c'est le cas en particulier de l'URT qu'EDF envisage de réintroduire sous forme de combustible URE à partir de 2023, après l'avoir fait de 1994 à 2013. Pour l'uranium appauvri, dans le scénario étudié, quelques 120 tonnes par an sont utilisées pour alimenter la fabrication des combustibles MOX. Les 4630 tonnes supplémentaires produites par an en monorecyclage Pu + URT sont entreposées, en attente d'utilisation en réacteurs de génération IV, de ré-enrichissement pour utilisation dans des REL, et/ou d'une valorisation autre que dans l'électronucléaire.

Pour les besoins de l'étude ACV, nous avons donc considéré ici que les matières issues du fonctionnement des usines W et TU5 sont stockés en catégorie FA-VL en fonctionnement, qui seront comptabilisés dans les volumes de chaque catégorie de déchets radiologiques.

Les volumes correspondants, tels qu'ils sortent des deux usines, ont été déterminés avec leur conditionnement adapté à un entreposage en parc (hangars fermés) ; les valeurs figurent dans le tableau suivant.

Tableau 22 : Volumes FA-VL entreposés pour l'U appauvri et l'URT

	Cycle actuel		Cycle ouvert
	U appauvri	URT	U appauvri
Type d'emballage	cube DV 70	fût 200 L	cube DV 70
Volume unitaire emballage (m ³)	3,408	0,2	
Nombre d'emballages en 2016	1139	4298	
Production 2016 (tU/an)	10390	1085	
Production nécessaire pour le cycle associé (tU/an)	7425	1006	8270
Volume annuel à entreposer pour le cycle (m ³ /an)	2774	797	3090
Volume annuel à entreposer pour le cycle (m ³ /tU)	0,374	0,792	0,374

Toutefois, dans la perspective d'un stockage de longue durée de ces matières, et à des fins d'optimisation, il est raisonnable de considérer que l'URT serait compacté, comme l'uranium appauvri en sortie de l'usine W, et reconditionné dans des conteneurs similaires aux DV70, plutôt que dans les fûts métalliques de 200 L utilisés aujourd'hui pour l'URT.

Compte tenu des productions de 2016, les volumes à stocker sont donc calculés avec le volume unitaire de 0,374 m³/tU. Les résultats sont présentés dans le Tableau 223.

Tableau 23 : Volumes annuels à stocker pour l'U appauvri et l'URT dans le cycle actuel (année 2016)

U appauvri (m ³ /an)	URT (m ³ /an)
3886	406

1.11 STOCKAGE DES DECHETS

Pour les déchets HA et MA-VL destinés à rejoindre la filière HA-MAVL (type Cigéo), les valeurs unitaires de volumes à excaver, ainsi que l'énergie associée et les matériaux de consolidation des alvéoles, sont précisés dans le Tableau 24 dans un souci de traçabilité. Ils se rapportent au dimensionnement thermique du centre de stockage [ANDRA 2010, 2012]. Pour le stockage des déchets HA dans le « cycle ouvert », l'étude, basée sur l'extrapolation des données ANDRA, est forcément simplifiée, puisqu'un stockage des déchets HA dans le cas d'un cycle 100% ouvert n'a jamais été considéré.

Tableau 24 : Données de base pour les déchets destinés à la filière de stockage HA-MAVL

Type de déchets	Assemblage UOX	Assemblage MOX	Conteneurs verre CSD-V	Conteneurs CSD-C	Conteneurs déchets technocimentés
Volume unitaire (m ³)	0,186	0,186	0,175	0,175	1,18
Volume excavé unitaire pour le stockage (m ³ /unité)	94	379	55	7,3	21
Besoin unitaire en électricité (MWh)	83,1	335	48,4	6,5	18,8
Béton (m ³ /unité)	50	50	29	1	2
Acier (t/unité)	4,2	4,2	1,6	1,56	0,27

1.12 DECHETS ET ENERGIES LIES A LA DECONSTRUCTION

Les données nécessaires à l'évaluation des déchets de déconstruction proviennent des différents inventaires réalisés par les acteurs du nucléaire. Les déchets de démantèlement ont été évalués pour l'ensemble des usines du cycle, à partir de données transmises par les producteurs.

Pour le démantèlement, le mix de 2030 a été considéré (cf. point 1.4.2. ci-dessus).

En ACV, les impacts du démantèlement sont répartis sur la durée de vie de l'usine, comme pour la construction.

En l'absence d'évaluation quantitative précise des déchets conventionnels qui seront produits lors du démantèlement des installations (très dépendante des stratégies de démantèlement retenues, variables d'un exploitant à un autre, et des contraintes réglementaires futures relatives à l'assainissement), cette catégorie de déchets liée aux démantèlements ne sera donc pas prise en compte dans le cadre de cette étude.

Ceci impacte le périmètre des données utilisées entre le démantèlement et les autres étapes de la vie des installations du cycle (construction et fonctionnement) et aura une certaine influence sur la comparaison entre les deux scénarios car il n'y pas le même nombre d'usines dans les deux cas.

ANNEXE 4 : Glossaire

Terme/signle	Définition
ACV	Analyse de cycle de vie
Article 9	Article du PNGMDR 2016-2018 demandant aux acteurs du nucléaire de déterminer les impacts environnementaux du cycle actuel avec monorecyclage du Pu et d'un cycle ouvert
CU	Combustible utilisé
Cycle URT	Étapes spécifiques du cycle permettant de passer de l'URT à du combustible URE
DEM	Démantèlement
Extrant	Flux de produit, de matière ou d'énergie sortant dans un processus élémentaire (ISO 14040)
EPR	Initialement European pressurized reactor, renommé Evolutionary power reactor
EPR2	Même principe qu'un EPR1 (le seul en France sera Flamanville 3) mais en mutualisant certaines fonctions d'un couple de réacteurs
Facteur de charge d'une unité de production électrique	Rapport entre l'énergie qu'elle produit sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné à puissance maximale
FC	Facteur de caractérisation : établi à partir d'un modèle qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie (ISO 14040)
FMA	Fiable et moyenne activité
GaBi	« Ganzheitliche Bilanzierung » (bilan global), logiciel d'ACV développé par la société SPHERA
Gen2	Génération 2 du parc nucléaire français, utilisant des réacteurs REP avec 3 types de tranches de puissance (900, 1300 et 1450 MW)
Gen3	Génération 3 du parc nucléaire français, utilisant des réacteurs EPR de 1650 MW
GES	Gaz à effet de serre
Intrant	Flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire (ISO 14040)
ISL	« In-situ leaching » : lixiviation in-situ
MCO	Mine à ciel ouvert
Monel	Groupe d'alliages à base de nickel principalement et de cuivre, résistant à la corrosion (en particulier par l'UF ₆)
MOX	"Mélange d'oxydes" – un combustible nucléaire
MS	Mine souterraine
NELCAS	"Nuclear Energy Life Cycle Assessment Simulation tool", logiciel d'ACV développé au CEA Marcoule
NT	Note technique
PF	Produit de fission
PNGMDR	Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs



RTE	Réseau de Transport d'Électricité, entreprise de service qui gère le réseau public de transport d'électricité haute tension en France métropolitaine
REP	Réacteur à eau pressurisée
SPHERA	Société américaine, liée à Blackstone, qui développe des solutions informatiques dans les domaines de la sécurité, de la santé et de l'environnement. C'est en Allemagne que SPHERA développe le logiciel d'ACV « GaBi », qui est devenu en 2023 « LCA for Experts »
tML ou tMLi	« Tonne de métal lourd » (métal lourd : U + Pu) ou « Tonne de métal lourd initial » (initial : avant irradiation), unités employées dans le cycle du combustible
TFA	Très fiable activité
Unité fonctionnelle	Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence, dans une analyse de cycle de vie
UTS	Unité de travail de séparation (enrichissement)
URT	Uranium de retraitement
UNE	Uranium naturel enrichi
URE	Uranium de retraitement réenrichi

ANNEXE 5 : Documents de référence

ANDRA, Documents techniques C.RP.ASTE.09.0707 du 6/04/2010 et C.NT.ADPG.12.0007 de 03/2012.

ANDRA, Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2018 à 2023

AIEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.4, Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options (2009)

ANDRA, Inventaire national des matières et déchets radioactifs 2018,

https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/andra-les_essentiels-2018.pdf

CEA 2023, Inventaire détaillé des matériaux de construction des EPR2, Données propres (Confidentiel)

Collectif, ANALYSE COMPAREE DU BILAN ENVIRONNEMENTAL D'UN CYCLE ELECTRONUCLEAIRE « MONORECYCLAGE PU » ET D'UN CYCLE OUVERT, Note de synthèse Orano, décembre 2018

Collectif, ACV 2018, Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire « monorecyclage pu » et d'un cycle ouvert, Orano, CEA, EDF, Décembre 2018.

<https://www.asn.fr/espace-professionnels/installations-nucleaires/le-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs#pngmdr-2016-2018>

Dones R., "Uranium Ore Processing", Ecoinvent report 6-VII (2009)

EDF, Note technique ACV du kWh nucléaire EDF, 6125-2406-2022-01201-FR, mai 2022

<https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf>

EU 2021. Commission Recommendation 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021H2279>

Frischknecht R. et al. (2000). "Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment." Environmental Impact Assessment Review 20, 159-189

Korotkevich V.M., Shikerun T.G., Reprocessed uranium handling at Siberian Group of Chemical Enterprises, Use of Reprocessed Uranium, Proc. Tech. Mtg., IAEA, Vienna (2007)

Ministère de la Transition Energetique, Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs 2022-2026 https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR_2022.pdf

Machiels A. and Sowder A., Advanced Nuclear Fuel Cycles —Main Challenges and Strategic Choices, Report No. 1020307, Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, September 2010. <https://www.epri.com/research/products/1020307>

Ministère de la transition énergétique, Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs, 2022-2026 https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR_2022.pdf

Poinssot C. et al. (2014). "Assessment of the environmental footprint of nuclear energy systems. Comparison between closed and open fuel cycles", Energy 69, 199-211

RTE, Bilan prévisionnel 2023-2035, 19/09/2023 <https://www.rte-france.com/actualites/bilan-previsionnel-transformation-systeme-electrique-2023-2035>

RTE, Futurs énergétiques 2050, scénario N2, octobre 2021 <https://rte-futursenergetiques2050.com/scenarios/n2>