



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)

-

Synthèse de l'étude comparative des différentes options de cycle du combustible

Réf. NT-DPS2D-2025/079

Sommaire

1. Introduction	7
2. Objectifs et périmètre de l'étude réalisée	7
2.1 Analyse de Cycle de Vie du cycle nucléaire, suivant quatre scénarios	7
2.2 Etude des enjeux sociaux, économiques et territoriaux, suivant deux scénarios	8
3. HYpotheses et résultats de l'analyse de cycle de vie des quatre scénarios de cycle du combustible nucléaire étudiés	9
3.1 Cycle ouvert (sans traitement du combustible usé UNE)	9
3.2 Cycle avec monorecyclage du plutonium (Pu)	9
3.3 Cycle avec monorecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)	10
3.4 Cycle avec multirecyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu)	11
3.5 Unité fonctionnelle	12
3.6 Principales hypothèses retenues sur l'ensemble du cycle du combustible	12
3.7 Résultats des indicateurs de catégories d'impact pour les 4 cycles	12
3.8 Contribution des grandes phases du cycle de vie	15
3.9 Economie de ressources naturelles	16
3.10 Enseignements sur les déchets	17
3.11 Synthèse des résultats pour les quatre scénarios - conclusion	20
4. methode et résultats de l'analyse multicriteres sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux	20
4.1 Description de la méthode utilisée	20
4.1.1 Identification des critères	20
4.1.2 Analyse des critères	21
4.2 Résultats et discussion	24
1.1.1. Matrice de performance	24
1.1.2. Agrégation des résultats	27
4.3 Synthèse des résultats - Conclusion	28

Liste des figures

Figure 1 : Cycle ouvert et flux de matières associés pour un parc de 24 réacteurs EPR2	9
Figure 2 : Cycle avec monorecyclage Pu et flux de matières associés pour le parc de 24 réacteurs EPR2	10
Figure 3 : Cycle avec monorecyclages du Pu et URT et pour le parc de 24 réacteurs EPR2	11
Figure 4: Cycle avec multirecyclage du Pu et URT pour le parc de 24 réacteurs EPR2	12
Figure 5 : Comparaison des impacts des 4 cycles avec le cycle monorecyclage Pu+URT en base de comparaison	14
Figure 6: Répartition des impacts du cycle multirecyclage Pu + URT par étape du cycle de vie	15
Figure 7: Variation de la production de résidus miniers (m3) en fonction de la fermeture du cycle	17
Figure 8: Flux annuels des catégories de déchets TFA et FMA-VC (m3)	18
Figure 9: Flux annuels des catégories de déchets FA-VL, MA-VL et HA (m3)	19
Figure 10 : parties prenantes sollicitées pour l'identification des critères, par positionnement vis-à-vis du traitement recyclage	21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats des indicateurs de catégories d'impacts pour les 4 cycles électronucléaires du parc Gen3 de 24 EPR2	13
Tableau 2 : Comparaison multi-critères des 4 cycles estimant le moins impactant.....	14
Tableau 3 :Evolution de la consommation d'uranium naturel selon les cycles	16
Tableau 4: Ecart relatifs entre cycles pour les volumes de déchets bruts	19
Tableau 5 : matrice de performance de l'analyse multicritère.....	25
Tableau 6 : matrice des scores (analyse centrale)	27
Tableau 7 : scores agrégés par famille de critères et par type de partie prenante	28
Tableau 8: Synthèse des hypothèses structurantes retenues	30
Tableau 9 : Calcul du nombre de piscines pour l'entreposage des combustibles usés non retraités.....	31
Tableau 10 : synthèse des tests de sensibilité	34

Synthèse de l'étude

Dans le cadre de l'article 1^{er} de l'arrêté du PNGMDR 2022-2026, le gouvernement a souhaité « éclairer les choix de la politique énergétique en explicitant les enjeux qu'ils posent pour la gestion des matières et des déchets radioactifs ». En particulier, une réflexion doit être menée sur les enjeux liés au cycle du combustible, notamment les enjeux environnementaux, économiques, sociaux et territoriaux. Cette action, nommée POL.1, est structurée en deux parties :

1. **une étude environnementale**, sous la forme d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV), visant à comparer des indicateurs d'impacts pour l'environnement pour un parc futur de 40 GWe (24 EPR2) pour les **quatre scénarios de cycles suivants** :
 - a) un cycle dit ouvert, sans retraitement du combustible utilisé UOX et donc sans recyclage de matières (plutonium et uranium de retraitement),
 - b) un cycle avec monorecyclage du plutonium,
 - c) un cycle avec monorecyclage de l'uranium de retraitement et du plutonium (cycle dit monorecyclage Pu+URT)
 - d) un cycle avec multirecyclage de l'uranium de retraitement et du plutonium (cycle dit multirecyclage Pu+URT),
2. en complément, une nouvelle **étude consacrée aux enjeux sociaux, économiques et territoriaux**, qui pourra également inclure les enjeux environnementaux tels qu'identifiés dans l'ACV, **en considérant un cycle dit ouvert et un cycle avec monorecyclage Pu+URT**

Les quatre scénarios de cycle étudiés sous la forme d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) couvrent 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.

L'étude comparative du cycle ouvert et du cycle avec monorecyclage du plutonium et de l'uranium de retraitement en termes d'enjeux sociaux, économiques et territoriaux s'appuie sur une analyse multiacteurs multicritères, analyse qui consiste à comparer les scénarios étudiés sur la base de critères de différentes natures, les travaux impliquant des parties prenantes d'origines et sensibilités diverses.

De l'ensemble de ces études, **il ressort globalement que 1) les cycles nucléaires avec traitement-recyclage sont plus favorables qu'un cycle sans traitement-recyclage dit "ouvert" et 2) plus le cycle est fermé, autrement dit plus le niveau de recyclage augmente, plus le cycle est vertueux au regard des enjeux analysés.**

Ainsi, les résultats de l'ACV 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 quatre 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.

Les résultats désagrégés de l'étude consacrée aux enjeux sociaux, économiques et territoriaux permettent de constater les différences entre les deux scénarios sur la base de chacun des critères des 4 familles considérées (critères financiers, environnementaux, territoriaux et sociétaux). Ils mettent

en évidence que les critères financiers sont peu discriminants et montrent l'absence de différences significatives sur les critères environnementaux. S'agissant de la dimension territoriale, les externalités économiques (emplois, valeur ajoutée, retombées fiscales) font pencher la balance en faveur du cycle avec mono-recyclage tandis que le critère sanitaire n'influe pas le choix du cycle et qu'il n'est pas possible de conclure sur le critère social pour les populations locales. Enfin, les critères sociétaux ouvrent le débat et soulignent qualitativement et quantitativement les principaux dissensus autour du cycle du combustible en France. Le résultat de ces quatre critères dépend du positionnement des parties prenantes vis-à-vis du traitement-recyclage. Les parties prenantes favorables jugent que le scénario avec mono-recyclage est meilleur en matière de souveraineté énergétique, de leadership scientifique et industriel et de considération du bien-être des générations futures mais n'estiment pas de différence discriminante sur le risque de prolifération. *A contrario*, les parties prenantes défavorables indiquent que le cycle ouvert domine sur l'ensemble des critères. L'avis des parties prenantes neutres est plus partagé selon les critères.

Le niveau d'analyse supplémentaire agrégeant les résultats au global de tous les critères permet de tirer des éléments de recommandations pour guider le choix du cycle. **Les résultats agrégés montrent que quelles que soient les opinions des parties prenantes retenues sur les critères sociétaux, le cycle avec mono-recyclage domine le cycle ouvert au global de toutes les familles de critères.** Cela s'explique principalement par la différence significative des externalités économiques des activités du cycle entre les scénarios. Le poids attribué aux différents critères n'est pas de nature à modifier les résultats de l'étude.

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 ouvert¹, 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, ainsi que de traiter l'ensemble des enjeux liés au « cycle », qu'ils soient environnementaux, territoriaux, sociaux ou économique.

2. OBJECTIFS ET PERIMETRE DE L'ETUDE REALISEE

L'étude est structurée en deux parties :

1. Une partie environnementale, sous la forme d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV), qui compare sur le plan environnemental quatre scénarios de cycle du combustible nucléaire,
2. Une partie consacrée aux enjeux sociaux, économiques et territoriaux suivant une analyse multicritère, comparativement entre un scénario de continuation du cycle actuel de mono-recyclage et un scénario correspondant à un hypothétique cycle ouvert.

2.1 ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU CYCLE NUCLEAIRE, SUIVANT QUATRE SCENARIOS

Les quatre scénarios de cycle nucléaire retenus pour l'ACV 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

¹ Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire « monorecyclage pu » et d'un cycle ouvert, Orano, CEA, EDF, Décembre 2018.

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.

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. 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.

Les 4 cycles modélisés sur la base du parc défini ci-dessus et les flux associés sont présentés ci-après. 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.

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 impliquent 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 capter. De la même manière, les besoins d'entreposage des combustibles usés doivent être analysés en dynamique pour être précis.

2.2 ÉTUDE DES ENJEUX SOCIAUX, ECONOMIQUES ET TERRITORIAUX, SUIVANT DEUX SCENARIOS

L'approche méthodologique retenue pour l'étude est **l'analyse multicritères** qui consiste à comparer les scénarios étudiés sur la base de critères de différentes natures (environnementaux, économiques, sociaux, etc.). Ce choix a été retenu avec l'aval du groupe de travail multipartite du PNGMDR suite à la réunion du GT le 5 juillet 2023 où les avantages et inconvénients de plusieurs méthodes possibles ont été présentés. Dans une analyse multicritère, la performance des critères est évaluée, pour chaque scénario, à partir de métriques quantitatives ou de scores définis dans le cadre de l'étude selon les critères. Ces scores reposent sur les opinions d'experts et de parties prenantes de différentes sensibilités, ayant une bonne connaissance des différents sujets étudiés. Les résultats de chaque critère sont ensuite convertis en une unité commune (par exemple un score global sur 100) puis agrégés afin de juger du scénario le plus souhaitable.

La méthode utilisée permet de traiter d'enjeux complexes à mesurer du fait de leur nature ou de l'absence de données. Par ailleurs, elle permet de rendre compte d'enjeux objets de dissensus entre les parties prenantes concernées directement ou indirectement par le cycle du combustible.

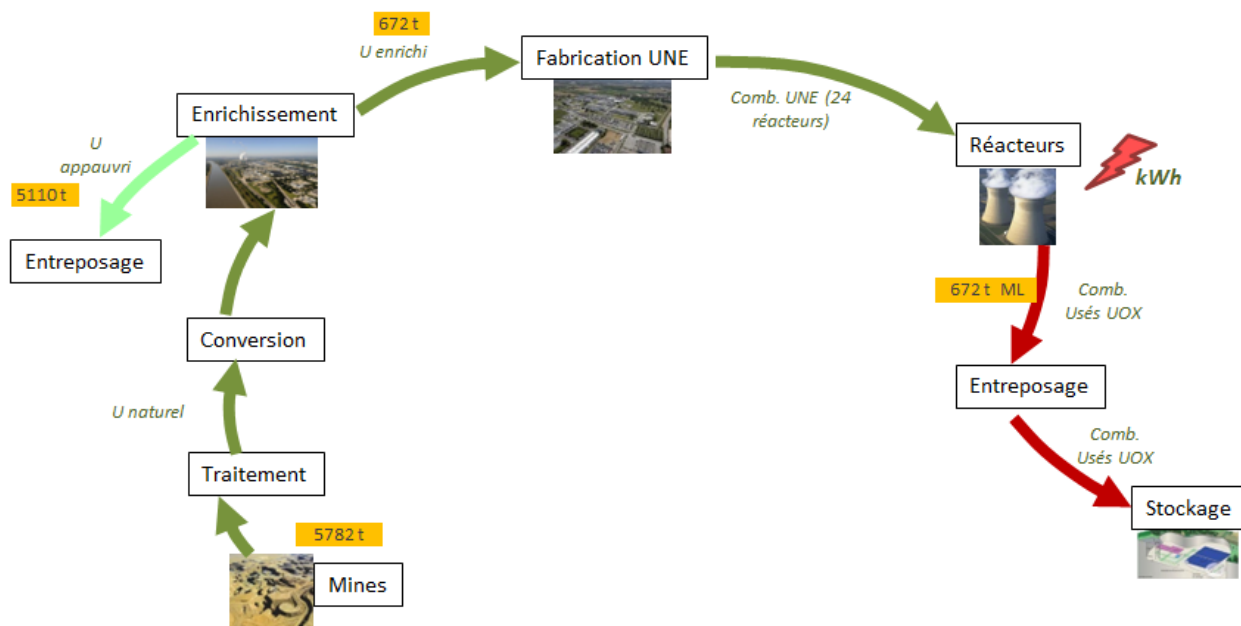
3. HYPOTHESES ET RESULTATS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES QUATRE SCENARIOS DE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE ETUDIES

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.

3.1 CYCLE OUVERT (SANS TRAITEMENT DU COMBUSTIBLE USE UNE)

Dans ce scénario, il n'y a ni traitement du combustible utilisé 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



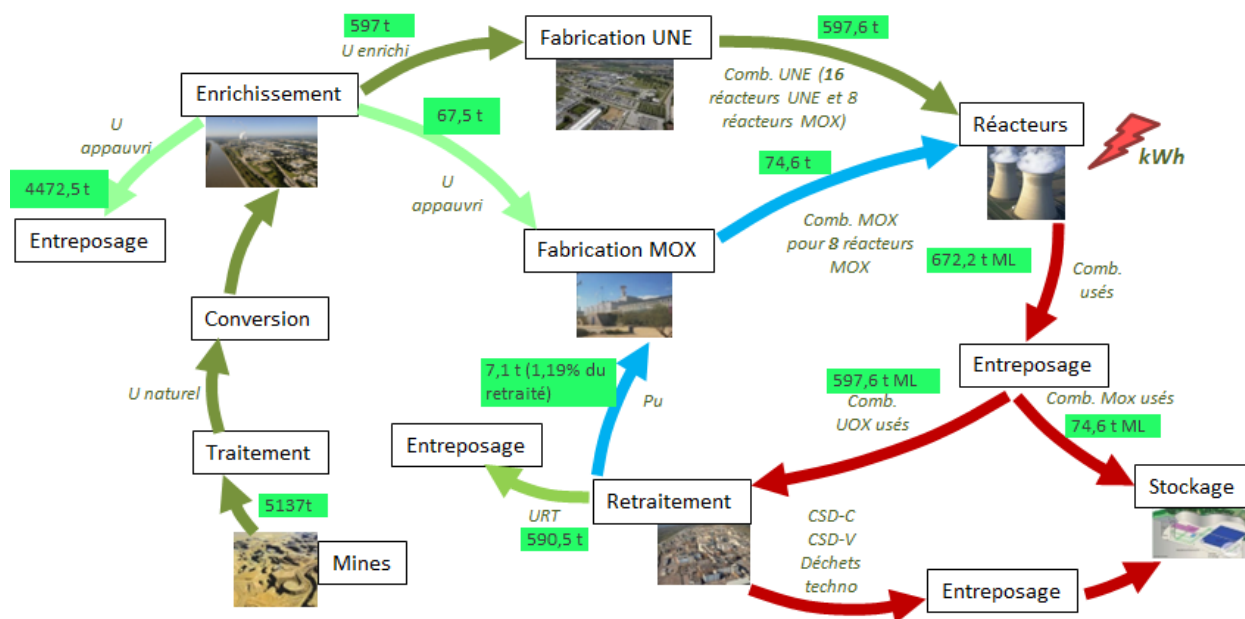
3.2 CYCLE AVEC MONORECYCLAGE DU PLUTONIUM (Pu)

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 utilisé UNE est traité. Le plutonium issu de ce traitement est recyclé en combustible MOX dans un nombre

adapté de réacteurs pour l'équilibre des flux²: 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.

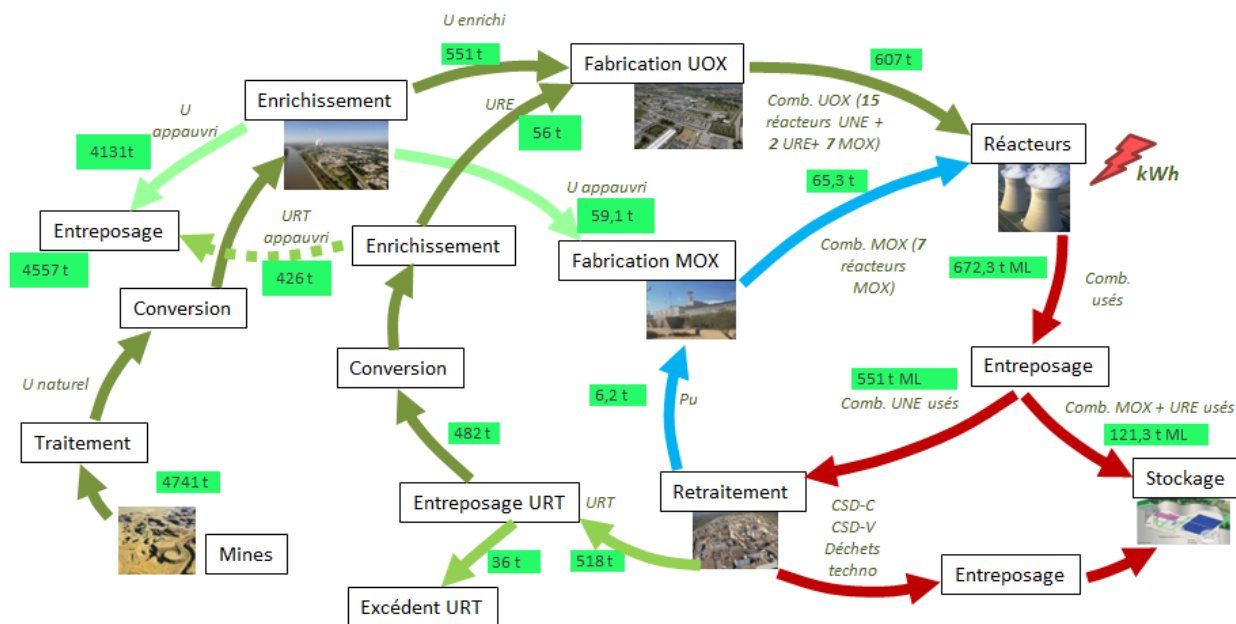
Figure 2 : Cycle avec monorecyclage Pu et flux de matières associés pour le parc de 24 réacteurs EPR2



3.3 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.

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


3.4 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.

Tableau 1 : 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



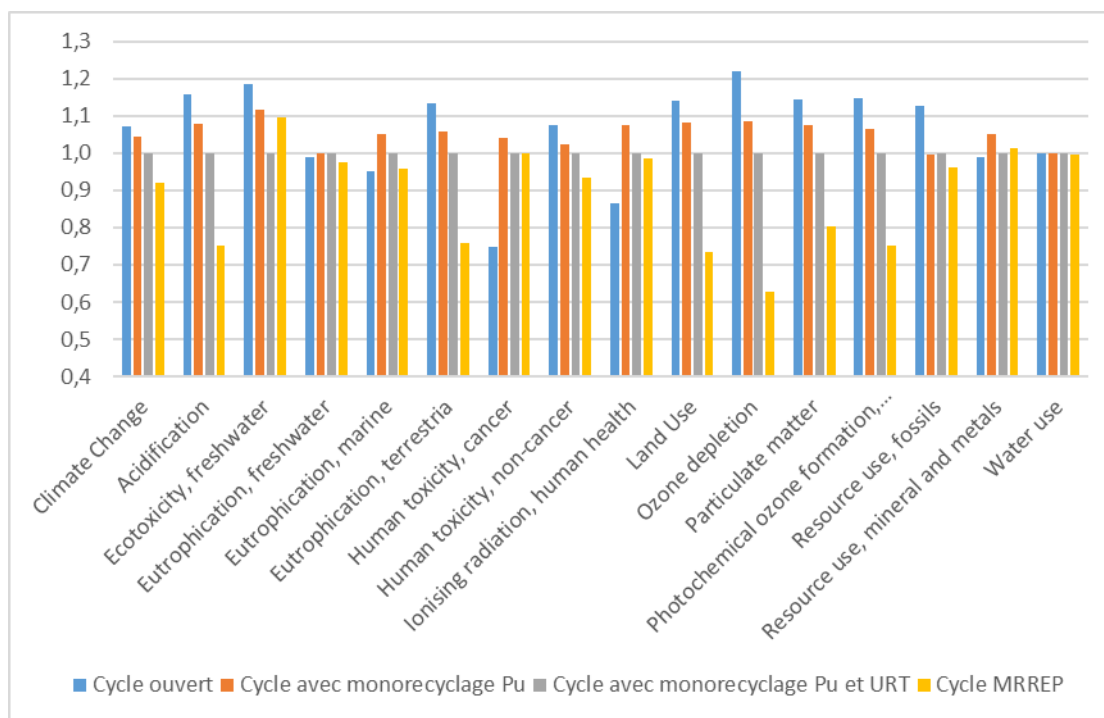
Au global, le tableau ci-dessus montre que les indicateurs ont tendance à s'améliorer avec la fermeture du cycle. Il ressort que le cycle ouvert est souvent le plus pénalisant alors que le cycle multirecyclage est souvent le plus favorable. Les couleurs permettent de rendre compte visuellement de cette tendance.

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 1, 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 2 : Comparaison multi-critères des 4 cycles estimant le moins impactant que le cycle mono-recyclage Pu+URT, utilisé comme référence

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.**

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.

En effet, 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. Le fait d'augmenter le recyclage de matières valorisables que sont le plutonium et l'uranium de retraitement diminue donc ces impacts.

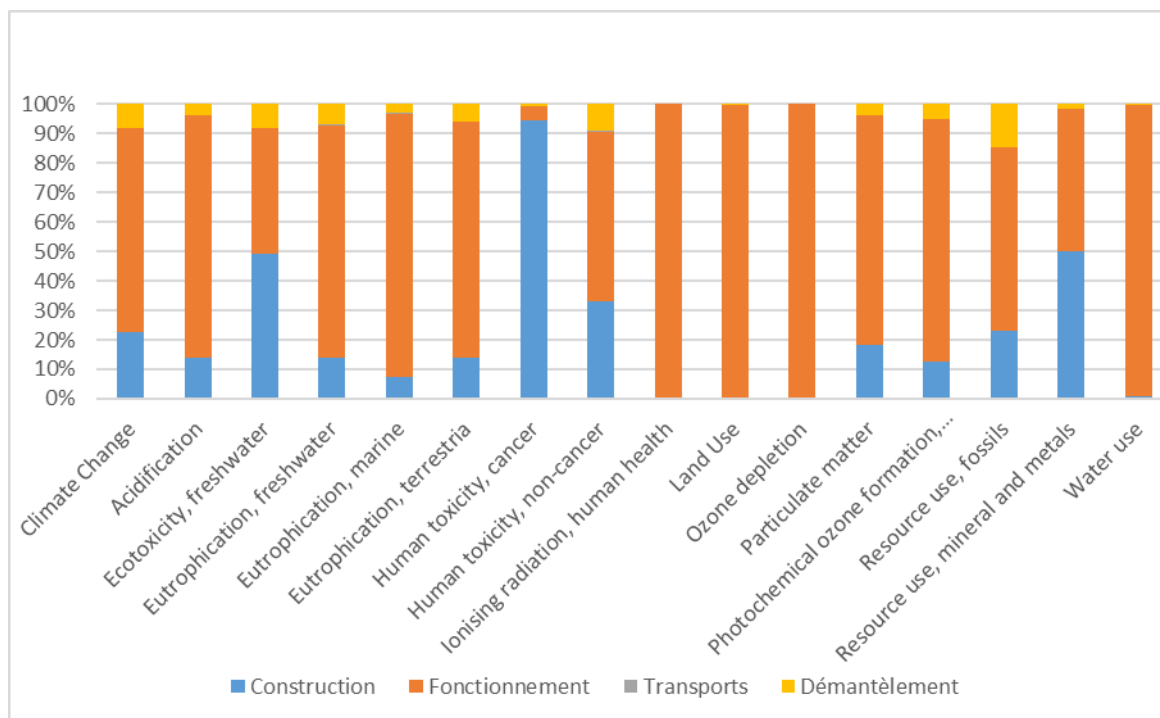
On constate également une amélioration significative en multirecyclage sur les indicateurs d'« appauvrissement de la couche d'ozone » et des « particules fines »). **Ainsi, le cycle avec multirecyclage Pu+URT a globalement le moins d'impact par comparaison avec les trois autres.**

3.8 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.

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-cancérogènes », « 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.

3.9 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. 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. Les économies d'uranium naturel sont synonymes d'une activité minière moins intensive, bonifiant ainsi un grand nombre d'autres indicateurs, dont l'indicateur de réchauffement climatique qui s'améliore à mesure que le degré de fermeture du cycle augmente. 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 3 :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

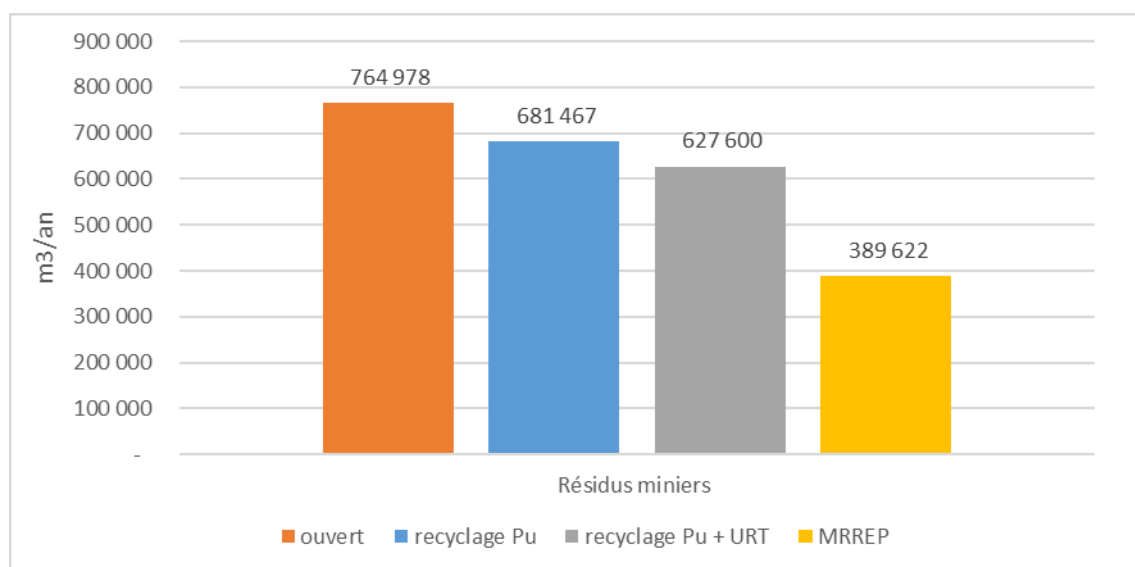
Comme il a été précisé en introduction, ces ordres de grandeurs résultent d'une analyse statique et ne prévalent en rien sur les résultats d'analyses dédiées aux économies de matières en mono et multirecyclage.

3.10 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 (volumes de « déchets bruts conditionnés » en sortie des installations). Les résultats présentés constituent une première approche des enseignements sur les déchets du parc de 40 GW d'EPR2, qui nécessitera d'être consolidée.

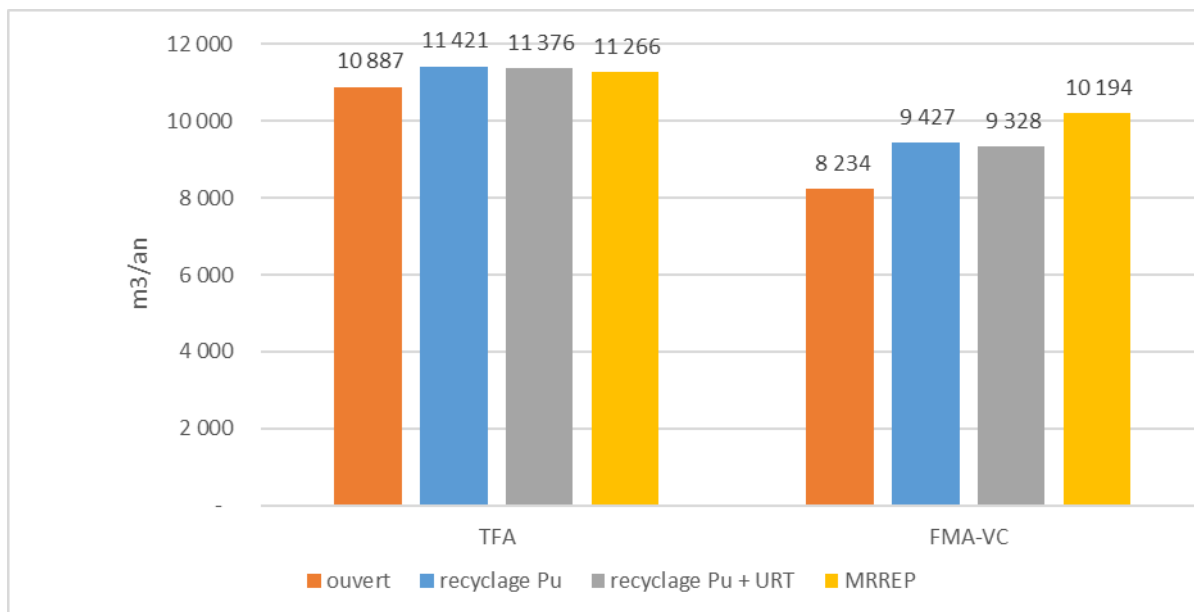
L'économie en uranium naturel réalisée dans le cas d'une fermeture du cycle se traduit par une baisse de productions de résidus miniers (cf figure 7).

Figure 7: Variation de la production de résidus miniers (m3) en fonction de la fermeture du cycle

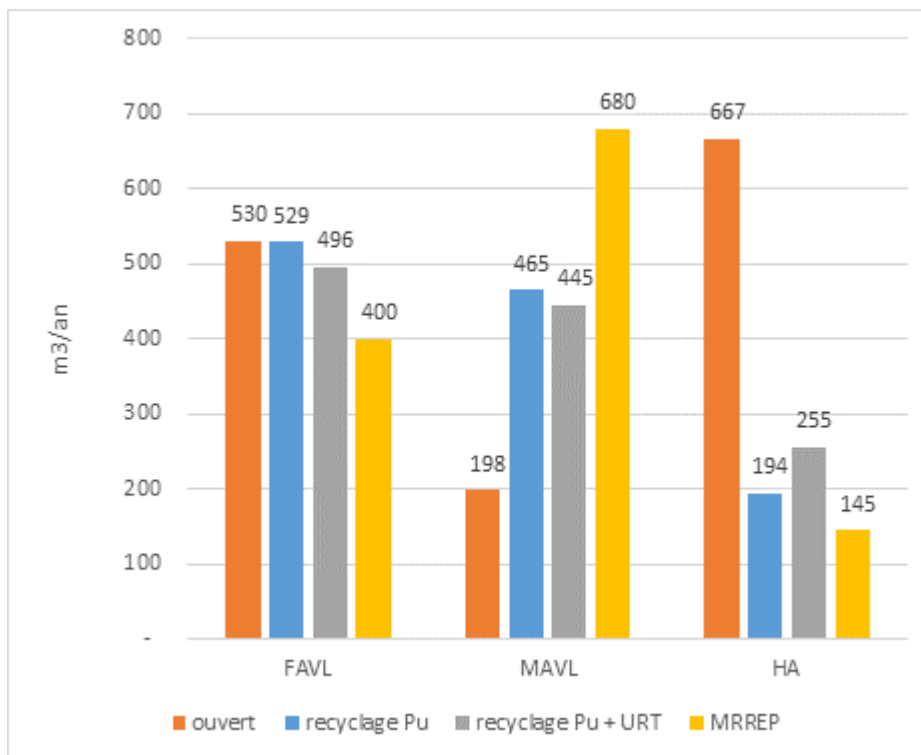


Les TFA sont très majoritairement originaires des réacteurs, par conséquent on n'observe pas de différence majeure entre les cycles. Pour les FMA-VC, bien que les réacteurs restent les principaux contributeurs, les usines de traitement ont un effet non négligeable. On remarque par exemple que le scénario 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 8: 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 9). 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 9: Flux annuels des catégories de déchets FA-VL, MA-VL et HA (m3)


Les déchets FA-VL sont majoritairement issus 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 réalité³.

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

Tableau 4: Ecart relatif 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%

³ 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.

FA-VL	0%	-6%	-24%
MA-VL	-57%	-4%	46%
HA	244%	31%	-25%

3.11 SYNTHÈSE DES RESULTATS POUR LES QUATRE SCENARIOS - CONCLUSION

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.

4. METHODE ET RESULTATS DE L'ANALYSE MULTICRITERES SUR LES ENJEUX SOCIAUX, ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

4.1 DESCRIPTION DE LA METHODE UTILISEE

4.1.1 Identification des critères

En amont de l'analyse des enjeux, un travail d'identification des critères a été mené sur la base d'entretiens avec des parties prenantes d'origines et sensibilités diverses, complété par une revue documentaire en France et à l'étranger. Douze critères de comparaison, en lien avec les enjeux à étudier conformément à la demande POL.1, ont été sélectionnés et catégorisés en quatre familles : les critères financiers, les critères environnementaux, les critères territoriaux et les critères sociétaux.

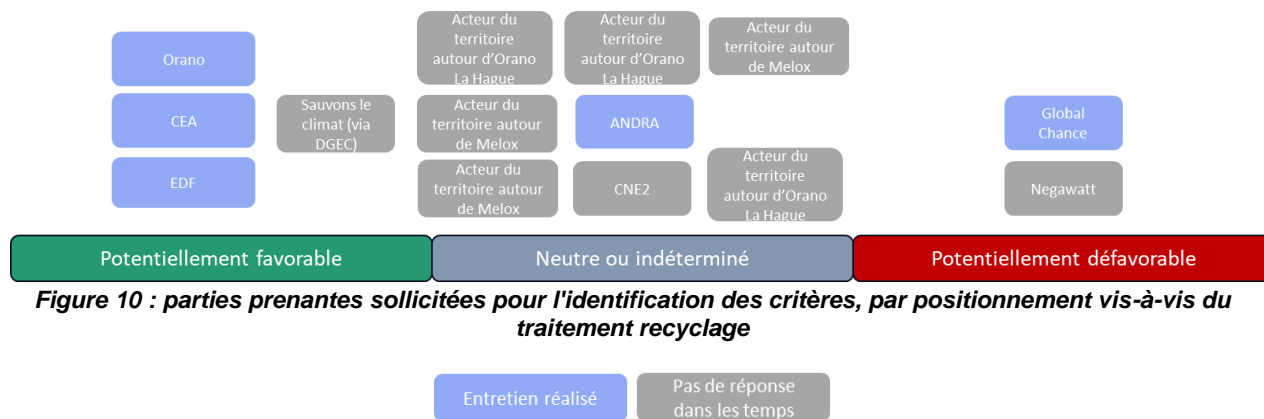
Les critères financiers comprennent l'ensemble des coûts du cycle du combustible (amont, aval, recherche).

Les critères environnementaux reprennent les enjeux de l'analyse de cycle de vie déjà réalisée au titre du précédent PNGMDR. Ces critères sont découpés en trois catégories : émissions de gaz à effet de serre, consommation d'eau et impacts sur les écosystèmes.

Les critères territoriaux tiennent compte des impacts sociaux et économiques sur les territoires autour des usines de l'aval du cycle, qui varient d'un scénario à l'autre. Cela inclut les impacts sociaux sur le quotidien des riverains et du territoire ; les impacts radiologiques et chimiques sur la population ; et les externalités économiques (emplois, valeur ajoutée, retombées fiscales).

Enfin, les critères sociétaux correspondent à des enjeux plus subjectifs par nature (ou faisant l'objet de dissensus), mais non moins importants. Cette dernière famille englobe la souveraineté énergétique de la France ; le leadership scientifique et industriel du pays ; l'intérêt porté aux générations futures ; et le risque de prolifération à partir de plutonium.

L'identification de critères pertinents pour l'analyse multicritère a été faite sur la base d'interrogation de parties prenantes, d'horizons et de sensibilités diverses :



L'ensemble des critères sont mesurés au travers d'un ou de plusieurs indicateurs. Ces derniers sont alimentés quantitativement par des données opérationnelles ou académiques lorsque cela est possible et qu'ils reflètent des critères objectifs. Dans le cas contraire, ils sont nourris par des scores de performance élicités des parties prenantes en entretien et accompagnés d'argumentaires qualitatifs.

4.1.2 Analyse des critères

4.1.2.1 Critères financiers

Un grand nombre d'études existent sur la question du choix du cycle du combustible nucléaire. La majorité s'intéresse à la comparaison des coûts globaux cumulés des parcs électronucléaires dans différents scénarios. Le résultat principal découlant de la littérature existante depuis plusieurs décennies est celui d'un cycle ouvert moins cher qu'un cycle dit "fermé" (Taylor et al., 2022 ; Charpin, Pellat, Dessus, 2000). Il existe également un consensus pour dire que cette différence de coûts est relativement faible, d'autant plus si les coûts considérés sont les coûts globaux du parc électronucléaire, mais également que ce résultat économique repose sur beaucoup d'incertitudes, rendant la différence de coûts des cycles statistiquement non-significative. Par ailleurs, la littérature s'accorde à dire qu'il est nécessaire de considérer davantage de facteurs pour être capable de faire un choix sur le cycle du combustible nucléaire tels que l'emploi et les retombées économiques, la prolifération, la souveraineté, etc. Enfin, la part des coûts de l'aval du cycle dans le coût total au kWh est relativement faible au regard des coûts associés aux investissements et au fonctionnement des réacteurs.

Les résultats de ces études sont cependant à interpréter avec précaution dans la mesure où certaines d'entre elles n'ont pas été menées en Europe et le cycle dit "fermé" ne correspond pas toujours à un cycle URT+Pu. Le contexte de la France étant particulier (un des seuls pays à effectuer le traitement-recyclage), l'utilisation des résultats calculés dans des situations éloignées de celle de la France est rendue difficile. L'étude de Charpin, Pellat, Dessus (2000) est l'étude qui possède le contexte et les hypothèses les plus proches de ceux de la présente analyse. A défaut de données complètes pour réaliser une estimation robuste et d'une évaluation plus récente en France, le résultat de cette dernière étude est donc retenu : la différence de coût au kWh entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert est de 1% en faveur du cycle ouvert. Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution et soulève la nécessité d'une mise à jour de l'étude Charpin, Pellat, Dessus.

Enfin, d'après les entretiens menés avec le CEA, acteur majeur sur le cycle du combustible, la R&D serait moins active en cycle ouvert et son budget associé serait par conséquent moins élevé par rapport à celui en cycle URT+Pu. La différence n'est pas quantifiable mais l'ordre de grandeur des coûts de R&D est relativement faible par rapport aux autres coûts du cycle.

4.1.2.2 Critères environnementaux

Le critère d'émissions de GES est un indicateur largement utilisé dans les études ACV et peut être interprété avec un niveau de confiance raisonnable. Les émissions de GES sont proches en cycle ouvert et en cycle Pu (cf étude ACV) et le volume d'émissions de GES générées par la production d'électricité à partir d'énergie nucléaire est faible en comparaison des autres énergies. Le niveau de recyclage a toutefois un effet favorable sur l'émission de GES, dans la mesure où il réduit les activités minières qui concentrent une partie importante des impacts environnementaux.

L'utilisation d'eau est également équivalente entre les deux cycles. Le volume d'eau non restitué dans l'environnement est relativement faible dans les deux cycles et repose quasi-intégralement sur l'exploitation des réacteurs. Ce critère ne constitue donc pas un facteur discriminant.

Les autres indicateurs ACV relatifs aux impacts sur les écosystèmes sont complexes et leur interprétation nécessite d'être pris avec précaution.

4.1.2.3 Critères territoriaux

Les données publiques associées à une enquête d'opinion et à deux entretiens avec des acteurs locaux permettent d'éclairer sur les enjeux sociaux dans la situation actuelle autour des usines d'Orano La Hague et Melox. Les entretiens ont en particulier donné lieu à des scores de performance sur les indicateurs sociaux, basés sur la situation actuelle. Les impacts sociaux sont sensiblement plus élevés autour de l'usine à La Hague qu'à Marcoule mais restent limités dans les deux cas avec un score global de 3,89/6 (6 étant l'absence totale d'externalités sociales négatives). Ces résultats, bien qu'intéressants pour matérialiser des enjeux difficiles à quantifier, doivent être considérés avec précaution et devraient être approfondis en augmentant l'échantillon d'acteurs territoriaux interrogés. Par ailleurs, ces impacts sociaux ne peuvent être comparés entre les deux cycles compte tenu du manque d'informations précises sur le territoire d'accueil du centre d'entreposage de combustibles usés en cycle ouvert.

Le second critère vise à mesurer les impacts radiologiques et chimiques sur la population locale et les travailleurs des installations de traitement-recyclage (cycle URT+Pu) et d'entreposage (cycle ouvert). Les études existantes sur le sujet et les entretiens menés avec une variété de parties prenantes montrent qu'il n'y a pas d'impact sur la santé et que ce critère n'est pas discriminant pour le choix du cycle. Bien que les doses radiologiques et les rejets soient moins

élevés en cycle ouvert, leurs valeurs restent très faibles en cycle URT+Pu, bien en-deçà des valeurs réglementaires.

Le critère d'externalités économiques apparaît en revanche comme largement discriminant en faveur du cycle URT+Pu, qu'il s'agisse des indicateurs d'emploi, de valeur ajoutée ou de retombées fiscales. Cela s'explique par les différences d'activités entre les deux cycles : le traitement-recyclage requiert une main d'œuvre importante et très qualifiée et la multiplication des étapes du cycle ajoute des usines en fonctionnement sur plusieurs territoires tandis que l'entreposage en cycle ouvert nécessite un unique site avec des opérations moins complexes. Au global, le cycle URT+Pu entraîne près de 12 000 emplois, 1 Md€/an de valeur ajoutée et 38 M€/an de retombées fiscales supplémentaires par rapport au cycle ouvert. Cette différence repose toutefois sur un certain nombre d'hypothèses (constance des effets dans le temps notamment).

4.1.2.4 Critères sociétaux

Le critère de souveraineté énergétique de la France présente des résultats ambigus puisque ces derniers dépendent des parties prenantes. L'ensemble des acteurs s'accorde à dire que la France n'est pas indépendante pour son approvisionnement en combustible puisqu'elle ne possède plus de mines d'uranium sur son territoire. Le traitement-recyclage du plutonium et de l'uranium permet d'économiser 20 à 25% d'uranium naturel, ce qui représente un renforcement du niveau d'indépendance pour les parties prenantes favorables mais qui n'a pas une influence significative sur ce niveau par rapport au cycle ouvert pour les parties prenantes défavorables et neutres qui estiment que la France reste toutefois complètement dépendante. Ces mêmes parties prenantes pensent que le niveau de fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique est meilleur en cycle ouvert compte tenu d'une moindre complexité des usines de l'aval par rapport à un cycle avec mono-recyclage et des problèmes récents constatés sur les installations à La Hague et Melox. Les parties prenantes favorables estiment que le risque de rupture est faible à très faible quel que soit le scénario et que les problèmes récents n'ont pas affecté la production nucléaire. Cette opinion est justifiée par le fait que les problèmes peuvent être anticipés et des marges de manœuvre existent afin d'éviter une interruption de la production électronucléaire qui nous rendrait plus dépendant de l'extérieur pour s'alimenter en électricité. Au global de ces deux indicateurs, le critère de souveraineté performe mieux en cycle ouvert pour les parties prenantes défavorables et neutres tandis qu'il performe mieux en cycle avec mono-recyclage pour les parties prenantes favorables.

L'analyse du critère leadership scientifique et industriel montre que le niveau de la France, tant sur ses compétences humaines, son niveau de R&D que son rayonnement à l'international, est reconnu pour être fort voire très fort selon les parties prenantes. La majorité d'entre elles explique cela par le fait que la France est le seul pays du monde occidental à posséder la compétence industrielle du traitement-recyclage, à l'exception d'un acteur qui vante plutôt les compétences de la France en matière de stockage (3ème derrière la Finlande et la Suède). Le maintien de la compétence de traitement-recyclage constitue cependant un véritable enjeu. Les conséquences identifiées d'un passage en cycle ouvert ne sont pas les mêmes selon les parties prenantes. La grande majorité d'entre elles affirment que cette transition conduirait à une perte conséquente et presque irréversible de la compétence en traitement-recyclage, ce qui amènerait la France au même niveau que les autres pays dans le monde (niveau modéré). Une partie prenante y voit cependant l'opportunité de développer la recherche dans le stockage du combustible usé qui pourrait s'avérer être un potentiel de transfert technologique intéressant pour la France. Au global des trois indicateurs, le critère leadership scientifique et industriel performe mieux en cycle ouvert pour la partie prenante défavorable tandis qu'il performe mieux en cycle avec mono-recyclage pour la partie prenante neutre et bien mieux dans ce même cycle pour les parties prenantes favorables.

L'intérêt porté aux générations futures est un sujet qui soulève d'importants dissensus qui se reflètent au travers des scores mais également sur les hypothèses des scénarios. Pour certaines parties prenantes favorables, le mono-recyclage entraîne un volume total de déchets plus important mais un volume de déchets HA bien moins élevé, ce qui devrait le plus importer pour les générations futures. Par ailleurs, elles estiment que le mono-recyclage permet de diminuer le niveau de dangerosité des déchets. Le gain en matière de volume et de dangerosité est cependant réduit si l'objectif de fermeture du cycle n'est pas atteint et que le MOX et l'URE irradiés deviennent des déchets. D'autres parties prenantes estiment que les volumes totaux et la dangerosité des déchets sont plus élevés en cycle avec mono-recyclage (ce qui est démenti par les données d'Orano et EDF pour les volumes) mais considèrent les MOX et URE usés comme des déchets et non pas comme des matières valorisables. Elles expliquent cela par le fait que les RNR ne seront probablement jamais développés et qu'il est risqué de se reposer sur cet objectif pour garantir les meilleures conditions aux générations futures. Les autres acteurs pensent au contraire qu'en poursuivant le mono-recyclage, le niveau technologique et de compétences transmis aux générations futures sera très élevé et que le choix stratégique entre un cycle ouvert et une orientation vers la fermeture de cycle leur sera laissé. Au global des indicateurs, le critère intérêt porté aux générations futures performe bien mieux en cycle avec mono-recyclage pour les parties prenantes favorables et neutres et mieux en cycle ouvert selon les parties prenantes défavorables (cf. matrice de performance).

Le critère de risque de prolifération ou d'utilisation malveillante du plutonium séparé fait l'objet d'un consensus entre une majorité de parties prenantes, avec des niveaux de risque faible à très faible dans les deux scénarios. Dans un scénario de poursuite du mono-recyclage, le stock de plutonium reste limité grâce à l'équilibre des flux et fait l'objet de dispositifs de surveillance strictement règlementés, notamment par l'AIEA. Le risque est encore plus faible en cycle ouvert compte tenu du niveau de compétence requis et des installations nécessaires pour parvenir à séparer le plutonium du combustible usé. Une partie de l'opposition réfute toutefois ces arguments et affirme que le risque est très fort dans le cycle avec mono-recyclage, notamment, selon elle, en raison de fragilités sur les dispositifs de sécurité et de l'existence même d'un stock de plutonium aujourd'hui et dans un futur incertain. Au global, le critère risque de prolifération performe bien mieux en cycle ouvert pour les parties prenantes défavorables et légèrement mieux selon les parties prenantes neutres. Pour les parties prenantes favorables, le critère n'est quasiment pas discriminant entre les deux cycles (cf. matrice de performance).

4.2 RESULTATS ET DISCUSSION

1.1.1. Matrice de performance

La matrice de performance permet d'exposer les résultats désagrégés de l'analyse afin d'identifier les différences entre les deux scénarios pour chacun des critères étudiés. Il est ainsi possible d'observer quels sont les critères discriminants et quelles sont les forces de chaque scénario.



PNGMDR 2022- 2026
(Action POL.1)
Synthèse de l'étude comparative des différentes options de cycle de combustible

Critère						
Scénario	Cycle Pu+URT			Cycle ouvert		
Coûts du cycle (/kWh)	Différence de 1% en faveur du cycle ouvert mais repose sur incertitudes fortes : évolution du prix de l'uranium, coûts stockage >> nécessite une analyse plus poussée Coût de R&D discriminant mais non quantifié					
Impacts sur écosystèmes	Légèrement en faveur du cycle Pu mais non-discriminant car ampleurs et écarts faibles – non-discriminant					
Emissions GES et consommation d'eau	Non-discriminants ; ordre de grandeur par ailleurs très faible en comparaison avec d'autres énergies					
Impacts radiologiques et chimiques	Non-discriminant car négligeable dans les deux cas ; enjeu sanitaire autour des risques en cas d'accidents soulevé par les opposants					
Externalités économiques	Emplois directs et indirects : 6700 7 000 emplois induits Total : 13700 Valeur ajoutée directe, indirecte, induite à terme : 2,23 milliards d'€ Retombées fiscales à terme : 82,15 millions d'€ par an			Emplois directs et indirects : 790 1180 emplois induits Total : 1970 Valeur ajoutée directe, indirecte, induite à terme : 1,08 milliards d'€ Retombées fiscales à terme : 44,18 millions d'€ par an		
Impacts sociaux sur riverains et territoires	Impacts modérés – score global moyen : 3,89/6			Pas de score mais impact potentiel fort sur paysage et image du territoire		
Critère	Positionnement partie prenante					
	Défavorable au traitement-recyclage		Neutre / Indéterminé		Favorable au traitement-recyclage	
Scénario	Cycle Pu+URT	Cycle ouvert	Cycle Pu+URT	Cycle ouvert	Cycle Pu+URT	Cycle ouvert
Souveraineté énergétique	1,75/6	2,5/6	2,50/6	3,25/6	4,46/6	3,81/6
Leadership scientifique et industriel	3,33/6	4,17/6	4,67/6	3,17/6	5,04/6	2,36/6
Intérêt porté aux futures générations	1,31/6	2,20/6	5,50/6	1,75/6	4,50/6	2,40/6
Risque de prolifération	2,00/6	4,83/6	4,50/6	5,00/6	4,90/6	4,80/6

Tableau 5 : matrice de performance de l'analyse multicritère

Pour les critères financiers, le coût de l'ensemble du cycle URT+Pu serait plus élevé de 1% que celui d'un cycle ouvert. Cette estimation est cependant nourrie d'incertitudes et n'a pu être approfondie faute de données. La différence de coût de la R&D semble significative et moins élevée en cycle ouvert mais n'a pu être quantifiée compte tenu de l'absence de données. Les montants restent cependant à relativiser par rapport aux ordres de grandeur des autres coûts du cycle du combustible.

S'agissant des enjeux environnementaux, le choix d'un cycle ou de l'autre n'entraîne pas de différences suffisamment significatives pour les juger comme discriminants.

Les critères territoriaux comprennent les impacts radiologiques et chimiques des activités du cycle qui sont jugés non-discriminants entre les deux scénarios compte tenu des faibles doses radiologiques et de l'absence de lien causal entre les rejets et la santé de la population. Néanmoins, les opposants soulignent que l'enjeu du débat repose sur les conséquences sanitaires en cas d'accidents et non pas lors du fonctionnement normal des usines.

Le cycle URT+Pu entraîne davantage d'activité économique à partir de 2040 avec 13 700 emplois directs, indirects et induits à terme contre seulement 1 970 en cycle ouvert (en prenant en compte les projections d'Orano et EDF sur le nombre d'entrepôts). Les activités de traitement-recyclage génèrent par ailleurs plus de valeur ajoutée directe, indirecte et induite, de l'ordre d'1,15 milliard d'euros supplémentaire par an à terme par rapport au cycle ouvert. Enfin, le cycle URT+Pu conduit à 38 millions d'euros de recettes fiscales supplémentaires par an à terme par rapport au cycle ouvert.

La dimension dynamique de l'étude est difficile à prendre en compte dans le cadre méthodologique retenu compte tenu des niveaux d'incertitude marqués et de l'horizon lointain. Les externalités économiques ont par exemple été calculées sur la base des données actuelles en supposant une évolution constante sur l'activité de traitement-recyclage et basée sur les projections d'Orano et EDF pour l'activité d'entrepôt. Par conséquent, il est supposé que le renouvellement des usines à La Hague et Melox en cycle URT+Pu n'a pas d'incidence sur l'évolution des emplois, de la valeur ajoutée et des retombées fiscales.

Le critère "impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires" montre que le niveau est modéré à faible en cycle URT+Pu avec un score moyen de 3,89 sur 6, ce qui signifie que les externalités sociales négatives des activités du cycle sont à relativiser, bien que des problématiques locales aient été soulevées. A noter que ce score repose uniquement sur deux parties prenantes.

Les critères sociétaux sont comparés sur la base des scores élicités au cours des entretiens qui dépendent du positionnement des parties prenantes vis-à-vis du traitement-recyclage. Ainsi, le cycle ouvert domine strictement le cycle URT+Pu sur l'ensemble des critères sociétaux selon les parties prenantes défavorables. Pour les parties favorables, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert pour tous les critères. Enfin, les parties prenantes neutres jugent que le cycle ouvert domine pour les critères "souveraineté énergétique" (moyenne des deux indicateurs) et "risque de prolifération" tandis que le cycle URT+Pu domine sur les critères "leadership scientifique et industriel" et "intérêt porté aux futures générations". L'écart sur ce dernier critère est particulièrement marqué selon les parties prenantes.

Cette matrice de performance résume les enjeux associés au choix du cycle du combustible nucléaire et résume l'état actuel du débat public entre les différentes parties prenantes. Afin de fournir un niveau d'analyse supplémentaire, une méthode d'agrégation des critères est explorée dans la section qui suit. Considérés comme non-discriminants pour le choix du cycle, les critères "coût de R&D", "impacts radiologiques et chimiques" et les critères environnementaux ne sont pas inclus dans la suite de l'analyse.

1.1.2. Agrégation des résultats

L'agrégation des résultats vise à calculer un score global pour chaque cycle à partir des résultats individuels de chaque critère d'étude. Pour être en mesure de réaliser un tel calcul, il est en premier lieu nécessaire de rendre les critères le plus comparable possible en les exprimant sous la forme d'un score commun. Le score utilisé dans l'analyse reprend l'échelle communément utilisé dans des analyses multicritères de 0 à 100, où 100 reflète le meilleur score que peut obtenir un scénario sur la base d'un critère et 0 le pire.

L'analyse est réalisée en posant l'hypothèse de poids identiques entre les indicateurs d'un critère puis entre les critères d'une famille puis entre les familles de critères. Des scores agrégés sont donnés pour chaque type de parties prenantes (neutre, favorable et défavorable au traitement-recyclage) afin de faire apparaître les dissensus.

Scénario	Cycle URT+Pu		Cycle ouvert			
Financier	99,00		100,00			
Coûts du cycle	99,00		100,00			
Territorial	67,84		24,62			
Externalités économiques	67,84		24,62			
Impacts riverains et territoires	Scores supposés identiques					
Positionnement des parties prenantes	Défavorable au traitement-recyclage		Neutre / Indéterminé		Favorable au traitement-recyclage	
Scénario	Cycle URT+Pu	Cycle ouvert	Cycle URT+Pu	Cycle ouvert	Cycle URT+Pu	Cycle ouvert
Sociétal	34,95	57,06	71,53	54,86	78,75	55,73
Souveraineté	29,17	41,67	41,67	54,17	74,31	63,54
Leadership	55,55	69,44	77,78	52,78	84,03	39,35
Futures générations	21,76	36,57	91,67	29,17	75,00	40,05
Prolifération	33,33	80,56	75,00	83,33	81,67	80,00

Tableau 6 : matrice des scores (analyse centrale)

Afin de simplifier la présentation visuelle des résultats, les scores sur 100 des indicateurs sont directement agrégés au niveau des critères.

Les scores agrégés par famille de critères sont exposés ci-dessous :

Positionnement des parties prenantes	Défavorable au traitement-recyclage		Neutre / Indéterminé		Favorable au traitement-recyclage	
	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert
Scénario						

Financier	99,00	100,00	99,00	100,00	99,00	100,00
Territorial	67,84	24,62	67,84	24,62	67,84	24,62
Sociétal	34,95	57,06	71,53	54,86	78,75	55,73
Score global	67,26	60,56	79,46	59,83	81,86	60,12

Tableau 7 : scores agrégés par famille de critères et par type de partie prenante

Ces résultats sont affichés par type de partie prenante pour faire apparaître les dissensus. Le score global du cycle URT+Pu dans la colonne des parties prenantes défavorables s'interprète comme suit : le score de performance globale du scénario URT+Pu s'élève à 67,26 si l'on considère uniquement les scores des parties prenantes défavorables pour les critères sociétaux. Les scores des autres familles de critères ne varient pas selon les types de parties prenantes car ils n'ont pas été estimés à partir d'entretiens reflétant des dissensus.

Les résultats agrégés montrent que quelles que soient les opinions des parties prenantes retenues sur les critères sociétaux (qui sont les plus subjectifs), le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert au global de toutes les familles de critères.

La famille de critères territoriaux est celle qui a le plus de poids pour déterminer cette dominance. En particulier, la différence de score entre les deux scénarios la plus significative est celle du critère d'externalités économiques avec un score de 24,62 en cycle ouvert contre 67,84 en cycle URT+Pu.

Ces résultats reposent toutefois sur des hypothèses de calcul et sur des incertitudes fortes (cf annexe 2).

4.3 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS - CONCLUSION

Une analyse de premier niveau des résultats désagrégés à l'échelle de chaque critère permet de constater les différences entre les deux scénarios :

- Les critères financiers sont peu discriminants ;
- Sur les critères environnementaux étudiés dans l'ACV et retenus dans la présente étude, l'analyse met également en évidence une absence de différences significatives entre les deux scénarios ;
- S'agissant de la dimension territoriale, les externalités économiques (emplois, valeur ajoutée, retombées fiscales) font pencher la balance en faveur du cycle avec mono-recyclage. Le critère sanitaire quant à lui, n'influe pas le choix du cycle. Enfin, il n'est pas possible de conclure sur le critère social pour les populations locales.
- La famille des critères sociétaux ouvre le débat et souligne qualitativement et quantitativement les principaux dissensus autour du cycle du combustible en France. Le résultat des quatre critères sociétaux dépend du positionnement des parties prenantes vis-à-vis du traitement-recyclage. Les parties prenantes favorables jugent que le scénario avec mono-recyclage est meilleur en matière de souveraineté énergétique, de leadership scientifique et industriel et de considération du bien-être des générations futures ; ils n'estiment pas d'impact et donc de différence discriminante sur le risque de prolifération. *A contrario*, les parties prenantes défavorables indiquent que le cycle ouvert domine sur l'ensemble des critères. L'avis des parties prenantes neutres est plus partagé selon les critères.

Une analyse de second niveau agrège les résultats au global de tous les critères. Ces résultats montrent que, quelles que soient les opinions des parties prenantes, **le cycle avec mono-**



recyclage domine, au global, le cycle ouvert. Cela s'explique principalement par la différence significative des externalités économiques des activités du cycle entre les scénarios.

Les tests de sensibilités réalisés sur les poids attribués aux différents critères montrent que ces derniers ne sont pas de nature à modifier les résultats, ce qui conforte les conclusions de la présente étude.

ANNEXE 1
Synthèse des hypothèses structurantes
Tableau 8: 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)	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
Conversion	UNE : 2 URE : 2	UNE : Malvésy 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		
Entreposage CU en piscines (1 piscine = 5000 tonnesML / 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 (durée supposée d'exploitation).

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 9 : 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'entreposages 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.

ANNEXE 2

Sensibilité et principales limites des résultats de l'analyse multicritères sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux

Plusieurs tests de sensibilité ont été effectués pour tester la robustesse des résultats. L'objectif des tests de sensibilité est de faire varier la valeur des paramètres sur lesquels de l'incertain pèse et de vérifier dans quelle mesure les résultats observés dans l'analyse principale changent. Cinq paramètres sont en particulier testés :

La pondération

- Entre les critères d'une même famille : l'analyse centrale suppose que les critères d'une famille ont le même poids, ce qui est incertain en l'absence d'une analyse plus approfondie et peut être testé.
- Entre les familles de critère : l'analyse centrale suppose également que chaque famille de critères possède le même poids dans le score global des scénarios, ce qui est également incertain en l'absence d'une analyse plus approfondie et peut être testé.

La différence de coûts du cycle entre les deux scénarios : celle-ci est, dans l'analyse principale, de 1% en faveur du cycle ouvert. Cette valeur étant incertaine, elle est testée et notamment afin d'identifier l'ampleur susceptible de modifier les résultats.

L'impact sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert : par manque d'informations spécifiques sur le territoire concerné par l'aval du cycle en cycle ouvert, il a été considéré que le score estimé en cycle URT+Pu est identique à celui en cycle ouvert. Cette hypothèse est relâchée dans un test de sensibilité pour identifier son influence sur les résultats.

Le tableau ci-dessous synthétise les hypothèses posées dans les différents tests de sensibilité menés et les conclusions principales.

Test de sensibilité	Hypothèse différente de l'analyse centrale	Résultats principaux
Pondération inégale entre les familles de critères	Le poids des familles de critères n'est plus supposé identique pour les 3 familles de critères	<p>Le cycle URT+Pu domine dans la quasi-totalité des combinaisons de poids des familles. Au global de toutes les parties prenantes, un poids supérieur à 91,35% pour la famille de critères financiers est l'unique combinaison entraînant une dominance éventuelle du cycle ouvert. Autrement dit, il faut une très forte préférence pour le critère financier.</p> <p>En ne considérant que les opinions des parties prenantes défavorables, il suffit en revanche que le poids accordé aux critères sociétaux soit supérieur à 50% pour que le cycle ouvert soit préféré.</p>

<p>Pondération égale entre tous les critères</p>	<p>Le poids de l'ensemble des critères (toutes familles confondues) est désormais supposé identique. Cela permet de ne pas défavoriser les critères appartenant à une famille "nombreuse". Un second test permet ensuite d'étudier toutes les combinaisons possibles de poids entre les critères.</p>	<p>Contrairement à l'analyse centrale, le cycle ouvert domine en ne considérant que les préférences des parties prenantes défavorables au traitement-recyclage.</p> <p>En prenant en compte l'ensemble des préférences des parties prenantes (agrégation au global de tous les répondants), le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert dans 97,97% des combinaisons de poids possibles entre les critères</p>
<p>Différence de coûts du cycle plus importante entre les 2 scénarios</p>	<p>Ce test cherche la différence en pourcentage du coût financier entre les deux cycles susceptible de changer la conclusion de l'étude</p>	<p>En considérant que les poids des familles de critères sont égaux, si le coût du cycle URT+Pu est environ 2 fois plus important que celui du cycle ouvert, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu</p>
<p>Absence d'impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert</p>	<p>L'impact sur le quotidien des riverains et des territoires est supposé nul en cycle ouvert, ce qui signifie que le cycle ouvert performe parfaitement sur ce critère</p>	<p>Le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert lorsque les opinions des parties prenantes neutres ou favorables sur les critères sociétaux sont retenues. Si les opinions des parties prenantes défavorables sur les critères sociétaux sont considérées, le cycle ouvert domine légèrement le cycle URT+Pu</p>
<p>Absence d'impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert + pondération inégale entre les familles de critères</p>	<p>L'impact sur le quotidien des riverains et des territoires est supposé nul en cycle ouvert, ce qui signifie que le cycle ouvert performe parfaitement sur ce critère.</p> <p>Les pondérations entre famille de critères ne sont pas supposées comme étant égale d'une famille à une autre</p>	<p>Au global de toutes les parties prenantes, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu seulement si le poids associé à la famille de critères financiers est supérieur à 83,16%.</p> <p>Dans 99,30% des combinaisons de poids possibles entre les familles de critères, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert</p>

Tableau 10 : synthèse des tests de sensibilité

Les résultats de l'analyse multicritère semblent donc relativement peu sensibles aux paramètres analysés et à la pondération mais peuvent varier selon les opinions des types de parties prenantes considérées.

Au-delà de la sensibilité des résultats, la présente étude se heurte à quelques limites qu'il convient de souligner.

En premier lieu, les hypothèses définissant les scénarios qui ont été proposées par Orano et EDF puis validées lors du groupe de travail du PNGMDR du 5 juillet 2023 ont fait l'objet de critiques de la part des opposants mais aussi de l'IRSN, en particulier sur l'hypothèse d'entreposage en piscine au détriment d'un entreposage à sec. Une diversité insuffisante de parties prenantes a

été mobilisée pour l'identification des critères, s'expliquant par la période de congés d'été au cours de laquelle l'étape de l'étude s'est déroulée. Cela s'est traduit par des réticences sur les critères et indicateurs étudiés lors des entretiens visant à définir des scores sur ces derniers afin d'alimenter l'analyse. Le cadre d'analyse d'une AMC est structurante et peut avoir une influence sur les résultats d'une étude. Afin d'améliorer la pertinence des résultats de prochaines études, il sera souhaitable de s'assurer que l'ensemble des parties prenantes converge vers des scénarios, critères et indicateurs à considérer dans l'analyse. Des compromis devront être trouvés entre les parties prenantes et une augmentation du nombre de scénarios étudiés pourrait permettre d'envisager plusieurs hypothèses pour un même cycle.

Concernant l'analyse des critères, l'absence de données disponibles dans le temps imparti de l'étude a conduit à ne pas quantifier certains critères ou à utiliser des résultats de la littérature dont les hypothèses et scénarios ne sont pas parfaitement alignés avec ceux de la présente étude. C'est notamment le cas des critères financiers qui mériteraient une étude dédiée au sujet afin de mettre à jour le rapport réalisé en 2000 en France par Charpin et al.

Par ailleurs, le caractère dynamique de l'étude est parfois difficile à intégrer. C'est par exemple le cas pour les indicateurs économiques (emplois, valeur ajoutée...) ou encore environnementaux, sur lesquels il est complexe d'établir des projections d'évolution, faute de données. Le renouvellement des installations ou encore la construction des piscines d'entreposage impliqueront par exemple des emplois et des nuisances durant les chantiers, qui n'ont pu être comptabilisés. S'agissant des critères estimés à partir d'entretiens tels que les critères sociétaux, les parties prenantes ont montré des difficultés à se projeter au-delà de la situation actuelle, en particulier sur un horizon de temps aussi long.

Les critères estimés à partir d'entretiens reposent sur un échantillon relativement faible de parties prenantes. Un échantillon plus élevé permettrait d'améliorer la robustesse des résultats de l'analyse. Pour cette raison, les scores agrégés au global de l'ensemble des parties prenantes n'ont pas été présentés dans l'analyse centrale car ces derniers sont dépendants de l'échantillon d'acteurs interrogés. Cependant, une diversité importante de parties prenantes a pu être interrogée, ce qui limite les risques d'écarts importants entre les estimations de scores par type de parties prenantes et les vrais scores. Il convient de noter que la représentativité de l'écosystème n'est pas parfaite compte tenu de l'absence de certaines parties prenantes clés dans l'échantillon comme l'Etat, l'Andra, davantage d'acteurs territoriaux ou encore la CNE2.

Enfin, le calendrier de l'étude n'a pas permis de mener une troisième vague d'entretiens visant à étudier les préférences des parties prenantes sur l'importance relative des critères (exercice de pondération). Ces entretiens auraient pu réduire l'incertitude sur les résultats agrégés des 2 scénarios reposant sur des hypothèses de poids équitables. Le guide de l'IRSN recommande par exemple de donner un certain nombre de jetons aux parties prenantes et de les laisser les répartir entre les critères. Dogson (2009) recommande la méthode de "pairwise comparison" (comparaison par paires), dans laquelle les scores des critères sont comparés 2 à 2. Néanmoins, les poids estimés en réalisant des entretiens peuvent être biaisés car les parties prenantes peuvent avoir des comportements stratégiques et choisir de mettre du poids sur les critères qui favorisent le scénario qu'elles préfèrent. Il est complexe d'étudier un tel biais et d'affirmer que les poids élicités représentent les véritables préférences des parties prenantes. En ce sens, l'absence de l'étape de pondération n'est pas nécessairement une faiblesse significative des résultats de l'analyse.