

25 JANVIER 2024

Action POL.1 PNGMDR 2022-2026

Analyse comparative multicritère des enjeux économiques, sociaux, environnementaux et territoriaux du cycle du combustible nucléaire en France



RAPPORT D'ETUDE - VERSION FINALE

Réalisé par CITIZING et le CEPN pour Orano et EDF

CITIZING

Mathis FUNDARO

Dorian PINSAULT

Julie DE BRUX

CEPN

Ludovic VAILLANT

Sylvain ANDRESZ

RESUME DE L'ETUDE

Contexte et démarche méthodologique

Dans le cadre de l'élaboration du cinquième Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs (PNGMDR), 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), produite pour le précédent PNGMDR et actuellement poursuivie et complétée par les acteurs de la filière,
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.

La présente étude porte sur le second volet de l'action POL.1 et vise à comparer un **scénario de continuation du cycle actuel selon la stratégie dite de mono-recyclage** valorisant le plutonium et l'uranium issu du traitement de combustibles usés et un **scénario correspondant à un hypothétique cycle ouvert (sans traitement ni valorisation des matières)**.

- Le cycle avec mono-recyclage considère le maintien de l'activité de production de combustibles MOX à Melox (fabriqués à partir du plutonium issu du traitement des combustibles usés à base d'uranium naturel enrichi dits UNE et d'uranium appauvri) et l'europanisation de la filière URT (sur le segment conversion) pour produire des combustibles URE (fabriqués à partir de l'uranium de retraitement issu du traitement des mêmes combustibles UNE usés). La valorisation des combustibles MOX et URE usés dans les réacteurs de génération III (REP) ou dans des réacteurs de génération IV (RNR), selon la stratégie dite de multi-recyclage, n'est pas directement incluse dans l'analyse mais constitue une valeur d'option du scénario (à échéance seconde partie du siècle dans les REP et fin du siècle dans les RNR).
- Le cycle ouvert correspond à un scénario dans lequel les activités de traitement-recyclage des combustibles UNE usés sont arrêtées à l'horizon 2040, en cohérence avec le scénario SR3 "arrêt" du PNGMDR. Dans ce dernier, basé comme ici sur un futur parc, les combustibles usés non-traités après 2040 sont alors considérés comme des déchets et sont entreposés dans un centre d'entreposage centralisé en piscine en attendant leur stockage définitif.

L'analyse tient compte d'hypothèses relatives à l'évolution du parc nucléaire jusqu'à horizon 2100, qui est identique quel que soit le scénario.

L'approche méthodologique retenue pour l'étude est l'**analyse multicritère** 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. Elle est particulièrement utile pour alimenter un débat public et *in fine* pour éclairer les choix de politique énergétique.

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 du plutonium.

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.

Résultats et perspectives

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. Elle permet de tirer des éléments de recommandations pour guider les choix français en matière de cycle. 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.

Cette étude exploratoire et inédite, par la variété des critères pris en compte, et par la diversité des opinions qui s'y reflètent, pourrait valablement être approfondie, et ce dans plusieurs directions :

- Lorsque certaines données complémentaires seront disponibles, elles mériteraient d'être intégrées dans l'étude. Cette dernière pourrait alors faire l'objet d'une actualisation. Ces données sont par exemple celles issues de l'étude ACV en cours (portant sur la comparaison d'un cycle ouvert et d'un cycle avec mono-recyclage du plutonium et de l'URT sur un parc futur d'EPR2) ou encore le coût de la configuration relative à l'inventaire de réserve dans le cadre de l'adaptabilité de Cigéo (estimation en cours) et le coût de renouvellement des installations de traitement-recyclage ;

- La taille de l'échantillon d'acteurs pourrait être élargie, et des acteurs tels que la DGEC, l'Andra ou CNE2 devraient y prendre part. Il conviendrait également d'interroger davantage d'acteurs territoriaux, notamment pour affiner le critère social sur les populations locales dans un scénario avec traitement-recyclage et un scénario de cycle ouvert ;
- Des analyses plus poussées, conformes aux développements académiques sur la méthodologie de l'AMC, pourraient être entreprises : exercice d'attribution de poids des critères avec les parties prenantes, méthode de sur-classement et analyses s'appuyant sur des modèles statistiques notamment. Le premier développement permettrait d'obtenir un résultat final qui reflète fidèlement les préférences des parties prenantes sur le classement entre les critères. L'utilisation de méthodes de sur-classement rend les différences élicitées des parties prenantes en matière de performance entre les deux cycles plus significatives. Enfin, des analyses statistiques plus approfondies pourraient être réalisées avec une taille d'échantillon plus grande afin d'obtenir des résultats plus robustes.

Compte tenu des premiers résultats de la présente étude, et compte tenu de l'appétence et de la maturité technique des parties prenantes pour y participer, il apparaît que l'ensemble de prolongements et approfondissements suggérés plus haut seraient de nature à poursuivre la formation de jugements collectifs, dans une ambition de prise de décision éclairée.

TABLE DES MATIERES

1 /	CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE	11
2 /	DESCRIPTION DES SCENARIOS	13
	2.1. / Scénario "poursuite du mono-recyclage"	13
	2.2. / Scénario "transition vers un cycle ouvert"	15
	2.3. / Synthèse des caractéristiques principales des scénarios comparés dans l'étude ...	16
3 /	PROTOCOLE METHODOLOGIQUE	17
	3.1. / Choix de la méthodologie d'évaluation	17
	3.1.1. - Principes de l'évaluation socio-économique	17
	3.1.2. - Principes de l'analyse multicritère.....	18
	3.1.3. - Forces et faiblesses des deux approches.....	18
	3.2. / Démarche de l'AMC	19
	3.2.1. - Définition du cadre de l'étude	19
	3.2.2. - Identification des critères.....	19
	3.2.3. - Estimation de scores de performance des indicateurs.....	22
	3.2.4. - Matrice de performance et agrégation des résultats	24
	3.2.5. - Tests de sensibilité.....	25
4 /	DEFINITION DES CRITERES.....	26
	4.1. / Critères financiers	26
	4.2. / Critères environnementaux	27
	4.3. / Critères territoriaux.....	28
	4.4. / Critères sociétaux.....	29
5 /	ANALYSE DES CRITERES	32
	5.1. / Famille de critères financiers	32
	5.1.1. - Coûts du cycle.....	32
	5.1.2. - Coûts de R&D.....	37
	5.2. / Famille de critères environnementaux	39
	5.2.1. - Emissions de GES	39
	5.2.2. - Utilisation d'eau	40
	5.2.3. - Impacts sur les écosystèmes	40
	5.3. / Famille de critères territoriaux.....	42
	5.3.1. - Impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires	42
	5.3.2. - Impacts radiologiques et chimiques sur la population.....	48
	5.3.3. - Externalités économiques.....	51
	5.4. / Famille de critères sociétaux.....	57
	5.4.1. - Souveraineté énergétique de la France	58

5.4.2. - Leadership scientifique et industriel de la France.....	63
5.4.3. - Intérêt porté aux générations futures	70
5.4.4. - Risque de prolifération à partir de plutonium.....	81
6 / RESULTATS ET DISCUSSION.....	86
6.1. / Matrice de performance	86
6.2. / Agrégation des résultats.....	89
6.3. / Sensibilité et principales limites des résultats	91
7 / CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	94
8 / BIBLIOGRAPHIE	95
9 / ANNEXES	98
9.1. / Analyse complémentaire des nuages de points des critères sociétaux.....	98
9.2. / Tests de sensibilité	101
9.3. / Contexte historique du cycle du combustible au Royaume-Uni et en Suède.....	114

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : schéma des flux annuels en cycle URT+Pu, source : EDF-Orano	14
Figure 2 : schéma du cycle ouvert, source : EDF-Orano.....	15
Figure 3 : principe de l'évaluation socio-économique, source : Citizing	17
Figure 4 : parties prenantes sollicitées pour l'identification des critères, par positionnement vis-à-vis du traitement recyclage.....	20
Figure 5 : parties prenantes sollicitées pour l'analyse des critères, par positionnement vis-à-vis du traitement recyclage	23
Figure 6 : arbre des critères de l'étude	26
Figure 7 : courbe de densité de l'ensemble des coûts du cycle de différents scénarios par simulation de Monte Carlo, source : Taylor et al. (2022).....	34
Figure 8 : coûts normalisés aux coûts du cycle ouvert pour diverses options de cycles fermés, source : Taylor et al. (2022)	35
Figure 9 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur d'indépendance pour l'approvisionnement en combustible nucléaire.....	58
Figure 10 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur fiabilité de la production électronucléaire	61
Figure 11 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur niveau de compétence humaine.....	64
Figure 12 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur niveau de R&D	66
Figure 13 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur rayonnement de la France à l'international.....	68
Figure 14 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur volume de déchets	71
Figure 15 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur dangerosité des déchets	73
Figure 16 : décroissance radioactive par type de déchet, source : CNRS/IN2P3 cité par Laradioactivité.com	75
Figure 17 : Décroissance de puissance thermique en fonction du type de déchet, source : rapport de la CNE (2004) cité par Laradioactivité.com	76
Figure 18 : décroissance de la puissance thermique par type de combustible utilisé, source : IRSN (2018)	77

Figure 19 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur technologies et compétence industrielle laissées.....	77
Figure 20 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur le critère risque de prolifération à partir de plutonium	81
Figure 21 : distribution de la différence de score entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert en fonction des poids des familles de critères.....	103
Figure 22 : distribution de la différence de score entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert en fonction des poids des critères.....	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : type de réacteurs et flux d'uranium naturel du parc à son équilibre, source : hypothèses EDF	14
Tableau 2 : synthèse des caractéristiques des scénarios comparés.....	16
Tableau 3 : récapitulatif des critères et indicateurs de l'étude	31
Tableau 4 : coûts des étapes du cycle en % des coûts totaux, source : Taylor et al. (2022).....	33
Tableau 5 : quantité de combustibles usés (CU) à entreposer (en tMLi) et nombre de piscines par cycle, source : données Orano/EDF	36
Tableau 6 : volumes annuels de déchets et matières valorisables, source : CEA, Orano.....	37
Tableau 7 : intensité carbone des sources d'énergie, source : base carbone ADEME et pour (*) ACV 2018 Orano-EDF-CEA	40
Tableau 8 : estimation des indicateurs d'impact sur les écosystèmes, source : ACV du CEA (2018)	41
Tableau 9 : scores issus des entretiens avec des acteurs territoriaux selon la situation actuelle	46
Tableau 10 : score recodé des entretiens concernant les impacts sur les riverains en cycle URT+Pu	48
Tableau 11 : impact annuel 2022 des rejets liquides et gazeux pour chaque population de référence, source : rapport de surveillance de l'environnement (Orano, 2022)	49
Tableau 12 : dosimétrie des travailleurs (salariés Orano et prestataires) de 2019 à 2022, source : rapports d'information Orano La Hague et Melox (2020, 2021, 2022).	50
Tableau 13 : volumes de déchets et matières valorisables, source : CEA, Orano	73
Tableau 14 : flux de matières et déchets annuels, source : CEA (2018).....	80
Tableau 15 : matrice de performance de l'analyse multicritère	87
Tableau 16 : matrice des scores (analyse centrale).....	90
Tableau 17 : scores agrégés par famille de critères et par type de partie prenante	90
Tableau 18 : synthèse des tests de sensibilité	92
Tableau 19 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "souveraineté énergétique de la France".....	98
Tableau 20 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "leadership scientifique et industriel de la France"	99
Tableau 21 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "intérêt porté aux futures générations".....	99
Tableau 22 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "risque de prolifération"	100
Tableau 23 : résultats de l'analyse principale pour les opposants au cycle URT+Pu	101
Tableau 24 : résultats de l'analyse principale	102
Tableau 25 : résultats par critère de l'analyse principale.....	104
Tableau 26 : Scores agrégés pour les opposants avec une pondération par critère	104
Tableau 27 : matrice des scores (analyse centrale).....	107
Tableau 28 : scores agrégés par famille de critères et par type de partie prenante	108

LISTE DES ACRONYMES

ACV	Analyse cycle de vie - méthode d'évaluation environnementale
AMC	Analyse multicritère - méthode d'évaluation
AMR	Advanced modular reactor
CNDP	Commission nationale du débat public
CSD-C	Colis standards de déchets compactés - déchets de type MA-VL
CSD-V	Colis standards de déchets vitrifiés - déchets de type HA
CU	Combustible usé - combustible après utilisation en réacteur
EPR	Evolutionary power reactor - réacteur de génération III
ESE	Evaluation socio-économique - méthode d'évaluation
FA-VL	Déchets de faible activité à vie longue
FMA-VC	Déchets de faible à moyenne activité à vie courte
GES	Gaz à effet de serre
MA-VL	Déchets de moyenne activité à vie longue
MRREP	Multi-recyclage des combustibles usés en REP
MWe	MégaWatt électrique
HA	Déchets de haute activité
MOX	Mixed oxides - combustible nucléaire composé de plutonium et d'uranium appauvri
PNGMDR	Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
Pu	Plutonium (issu du traitement des combustibles usés)
REP	Réacteur à eau pressurisée - réacteur de génération II ou III
RNR	Réacteur à neutron rapide - réacteur de génération IV
SMR	Small modular reactor - Petit réacteur modulaire
TFA	Déchets de très faible activité
TMLi	Tonne de métal lourd initial
TWh	Térawatt heure - 1 milliard de kilowatt heure
Uapp	Uranium appauvri - faible concentration en isotope 235
UNE	Uranium naturel enrichi
UOX	Oxyde d'uranium - combustible nucléaire à base d'uranium enrichi (UNE) ou d'uranium de retraitement enrichi (URE)
URE	Uranium de retraitement enrichi
URT	Uranium de retraitement (issu du traitement des combustibles usés)
UP	Unité de production

1 / Contexte et objet de l'étude

Aujourd'hui, la France produit environ 70% de son électricité à partir d'un parc de 56 réacteurs à eau pressurisée (REP) exploités par EDF, soit environ 360 TWh sur 523 TWh produits en 2021. L'exploitation du parc s'appuie sur un ensemble d'installations industrielles implantées en France et hors France et couvrant les différentes étapes de l'amont et de l'aval du cycle du combustible nucléaire :

- Production d'uranium naturel hors France (Canada, Kazakhstan, Australie, etc.) ;
- Conversion de l'uranium naturel (Unat) en UF6 en France (dans les usines Comurhex de Malvési et du Tricastin) et hors France ;
- Enrichissement en uranium 235 de l'UF6 en France (à l'usine Georges Besse II du Tricastin) et hors France pour la fabrication du combustible UNE ;
- Conversion de l'uranium de retraitement (URT) en UF6 de retraitement et enrichissement en uranium 235 de l'UF6 de retraitement (hors Europe pour la conversion et en Europe hors France pour l'enrichissement) pour la fabrication du combustible URE ;
- Fabrication du combustible UNE en France (Romans-sur-Isère) et hors France ;
- Fabrication du combustible URE hors France ;
- Traitement du combustible usé UNE dans les installations Orano à La Hague (France) ;
- Fabrication de combustible MOX à l'usine MELOX de Marcoule (France) ;
- Installations en France de stockage pour les déchets radioactifs FMA-VC (Centre de Stockage de l'Aube) et TFA (Cires dans l'Aube) ;
- Installations en France d'entreposage (La Hague) et de stockage pour les déchets radioactifs FA-VL (stockage FA-VL), MA-VL et HA (projet Cigéo).

Ces installations produisent différents types de déchets ainsi que des matières valorisées ou pouvant faire l'objet d'une valorisation. Par exemple, l'uranium appauvri (Uapp) produit lors de l'étape d'enrichissement de l'UF6 peut être enrichi pour produire du combustible UOX. De même, l'uranium issu du traitement du combustible usé dans les usines de La Hague peut être converti puis enrichi pour produire du combustible (URE) et alimenter des REP. Le plutonium extrait du combustible usé à La Hague est quant à lui utilisé pour produire du combustible MOX et alimenter des REP.

La France est actuellement l'un des quelques pays, avec la Russie et le Japon, où la stratégie de traitement-recyclage à échelle industrielle vise à "fermer" le cycle en valorisant le plutonium et l'uranium de retraitement issu du traitement de combustibles usés après leur passage en réacteur. En ce sens, cette stratégie répond aux exigences de la France (via le code de l'environnement¹) de favoriser le traitement-recyclage à des fins notamment de réduction du volume et de la toxicité des déchets ultimes et de réduction des impacts environnementaux du fait d'un moindre besoin d'uranium naturel à extraire. Si le Royaume-Uni a pendant longtemps suivi la même voie que la France en matière de traitement du combustible usé en s'appuyant entre autres sur les installations de Sellafield, il a aujourd'hui opté pour un cycle ouvert. De même, en Suède, le combustible usé fait l'objet d'un entreposage dans une piscine centralisée après déchargement (description historique des cycles britanniques et suédois en annexe - cf. 9.3. /). Aux Etats-Unis, le combustible usé déchargé des réacteurs est entreposé à sec sur une installation dédiée, généralement dans le périmètre de la centrale². L'essentiel de l'activité des installations UP2-800 et UP3 d'Orano à La Hague est aujourd'hui tourné vers le traitement du combustible usé provenant des REP du parc EDF.

De nombreux travaux visant à évaluer les avantages et les inconvénients du cycle électronucléaire français avec du mono-recyclage par rapport à un cycle "ouvert" ont été réalisés. Ainsi, en réponse à l'article 9 du PNGMDR 2016-2018, Orano, EDF et le CEA ont produit un rapport intitulé *Analyse comparée des impacts pour l'environnement d'une stratégie de*

¹ article L542-1-2 modifié par LOI n°2020-1525 du 7 décembre 2020 - art. 16

² <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/map-fuel-storage-facilities.pdf>

*retraitement des combustibles usés en comparaison de celle qui résulterait de l'absence de retraitement*³. Cette analyse s'est appuyée sur la réalisation d'une Analyse Cycle de Vie (ACV) des 2 cycles, avec ou sans traitement du combustible usé (cycle avec mono-recyclage ou cycle "ouvert"). La Cour des Comptes a publié en 2019 un rapport portant sur *L'Aval du cycle du combustible nucléaire*⁴. Ce dernier rapport indique que *'Afin d'éclairer de manière complète et objective les décisions de politique publique, la comparaison économique et environnementale des alternatives est nécessaire mais les données et études manquent sur ce sujet'*.

Afin d'approfondir les travaux existants, l'édition 2022-2026 du PNGMDR⁵ propose plusieurs actions portant sur l'articulation entre la politique énergétique et la gestion des déchets et des matières radioactives. L'action POL.1 vise en particulier à *"éclairer les choix de la politique énergétique en explicitant les enjeux qu'ils posent pour la gestion des matières et des déchets radioactifs"*. En pratique, il s'agit d'approfondir les travaux publiés en 2018 (Orano, EDF et CEA) et mentionnés ci-dessus (travaux qui portent essentiellement sur des impacts environnementaux par le biais d'une approche de type ACV), mais également d'analyser les enjeux territoriaux, sociaux et économiques. Pour répondre à cette demande du PNGMDR, 2 volets complémentaires ont ainsi été engagés :

1. Approfondissement de l'évaluation comparée des impacts environnementaux d'un cycle du combustible nucléaire avec traitement du combustible usé (scénario poursuite du mono-recyclage) versus un cycle sans traitement du combustible usé (scénario transition vers un cycle ouvert). L'évaluation est menée et pilotée par Orano et EDF, en lien avec le CEA.
2. Réalisation d'une analyse comparée des 2 scénarios portant sur l'ensemble des enjeux, qu'ils soient sociaux, environnementaux, économiques ou territoriaux.

La définition des scénarios étudiés est un élément de contexte, une donnée d'entrée figée qui s'appuie sur des principes et hypothèses similaires pour les 2 volets de l'action POL.1.

L'étude en objet a été réalisée par le bureau d'études 'Citizing (avec l'appui du CEPN) à qui elle a été confiée, pour ses compétences, par EDF et Orano, en lien avec le CEA et avec l'accord de la DGEC (réunion du 27 juin 2023). Le contenu du présent document est le fruit de l'étude menée par Citizing, partagé et validé par les industriels en responsabilité dans le cadre de l'action POL1 du PNGMDR 2022-2026.

Il est organisé comme suit :

- Description des deux scénarios étudiés ;
- Approche méthodologique ;
- Définitions des critères d'évaluation ;
- Analyse ;
- Résultats, discussion et perspectives.

³ <https://www.asn.fr/espace-professionnels/installations-nucleaires/le-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs#pngmdr-2016-2018>

⁴ <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/20190704-rapport-aval-cycle-combustible-nucleaire.pdf>

⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNGMDR_2022.pdf

2 / Description des scénarios

Dans le cadre de cette étude et afin d'éclairer les décideurs publics sur les meilleures orientations stratégiques à choisir pour la France en matière de gestion des matières et déchets radioactifs, les deux scénarios suivants sont comparés :

- un scénario de poursuite du mono-recyclage actuel des matières (uranium et plutonium) issues du traitement des combustibles UNE usés,
- un scénario de transition vers un cycle ouvert dans lequel la stratégie de mono-recyclage actuelle est abandonnée à moyen terme (vers 2040 en cohérence avec le scénario SR3 "arrêt" du PNGMDR actuel)

Les différentes hypothèses spécifiques à chacun de ces scénarios sont explicitées dans la présente partie. L'étude est réalisée sur le périmètre français.

Les deux scénarios s'inscrivent dans un même cadre de référence défini par des hypothèses d'évolution du parc électronucléaire communes :

- Fermeture des 12 tranches 900 MWe entre 2027 et 2035 (conformément aux exigences de la PPE2 en vigueur à date).
- Durée de fonctionnement des autres réacteurs du parc actuel et futur considérée : 60 ans.
- Déploiement de 24 réacteurs EPR2 à partir de 2035, dont 14 d'ici 2050, se rapprochant du scénario N2 de RTE (production électronucléaire de 290 TWh à la fin du siècle), également pris en compte dans les scénarios de l'action POL.2 du PNGMDR actuel.

2.1. / Scénario "poursuite du mono-recyclage"

Le mono-recyclage du plutonium (Pu) pour la production électronucléaire est pratiqué en France depuis les années 1980. Il consiste à extraire le plutonium du combustible UNE utilisé par le traitement de ces derniers, réalisé à l'usine d'Orano à La Hague et à le réutiliser afin de fabriquer un nouveau combustible à l'usine d'Orano Melox, le MOX (mixed oxide). On parle alors de traitement-recyclage.

Le combustible utilisé contient par ailleurs de l'uranium (uranium de retraitement - URT) qui peut également être recyclé. Le mono-recyclage de l'URT permet la fabrication d'un nouveau combustible, l'URE (uranium retraité enrichi). Son recyclage a été arrêté en France en 2013 mais a repris en 2023 sur le palier 900MW avec le chargement de Cruas 2 en URE. Il va être étendu prochainement sur les autres réacteurs de Cruas avant d'être étendu à partir de 2027 dans des réacteurs 1300 MW, l'objectif d'EDF étant de consommer le stock accumulé depuis 2013 d'ici l'horizon 2050.

Dans ce scénario, à l'aval, il est supposé que la France continue le recyclage du plutonium actuel et reprenne celui de l'URT conformément à la reprise effective de la filière URE en 2023 par EDF. Dans tout le reste du rapport, ce scénario est donc appelé "cycle URT+Pu" pour signifier la poursuite de leur recyclage. Cette poursuite implique le renouvellement des installations de traitement-recyclage en France, supposé à horizon 2040.

Il est considéré que le MOX et l'URE sont utilisés dans les REP actuels autorisés et qu'un "moxage" et un "urtage" d'une partie du palier 1300 MW sera effectué avec les autorisations nécessaires. Il est ensuite supposé l'utilisation future du MOX et de l'URE dans le prochain parc composé d'EPR2.

Dans la mesure où seule une usine de conversion de l'URT est actuellement disponible hors Europe et qu'EDF vise à développer une filière plus européenne, il est supposé dans ce scénario le développement d'une future filière industrielle plus souveraine.

Les flux de matières et de déchets, considérés dans la présente étude pour analyser leurs impacts dans les domaines fixés (économiques, sociaux, environnementaux) pour ce scénario et celui de transition vers un cycle ouvert, sont issus

d'hypothèses posées par EDF. Les flux d'uranium naturel découlant de ces hypothèses sont résumés dans le tableau qui suit :

Type de réacteur / mode de gestion	Nombre de réacteurs	Masse annuelle d'uranium naturel enrichi pour le parc EDF (t/an)
900 MWe UOX Cyclades	6	103.8
900 MWe URE Garance	4	
900 MWe UNE Garance	2	36.2
900 MWe moxés	22	278.9
1300 MWe UOX	18	429.9
1300 MWe URE	2	
1450 MWe UOX	4	110.6
Total d'uranium naturel enrichi (t/an)		959.4

Tableau 1 : type de réacteurs et flux d'uranium naturel du parc à son équilibre, source : hypothèses EDF

Il convient de noter que ces flux reposent sur le parc actuel et devraient évoluer dans le temps avec la mise à l'arrêt de certaines tranches, la construction de l'EPR de Flamanville puis des EPR2 et l'urtage de tranches 1300 MWe.

A des fins de simplification, le nombre de réacteurs moxés et urtés considérés dans le scénario est défini de manière à assurer l'équilibre des flux : les quantités de matières recyclées produites par le traitement alimentent exactement les besoins des réacteurs en termes de plutonium et d'uranium de retraitement. Le schéma ci-dessous reprend les différentes étapes du cycle URT+Pu avec les flux de matières associés :

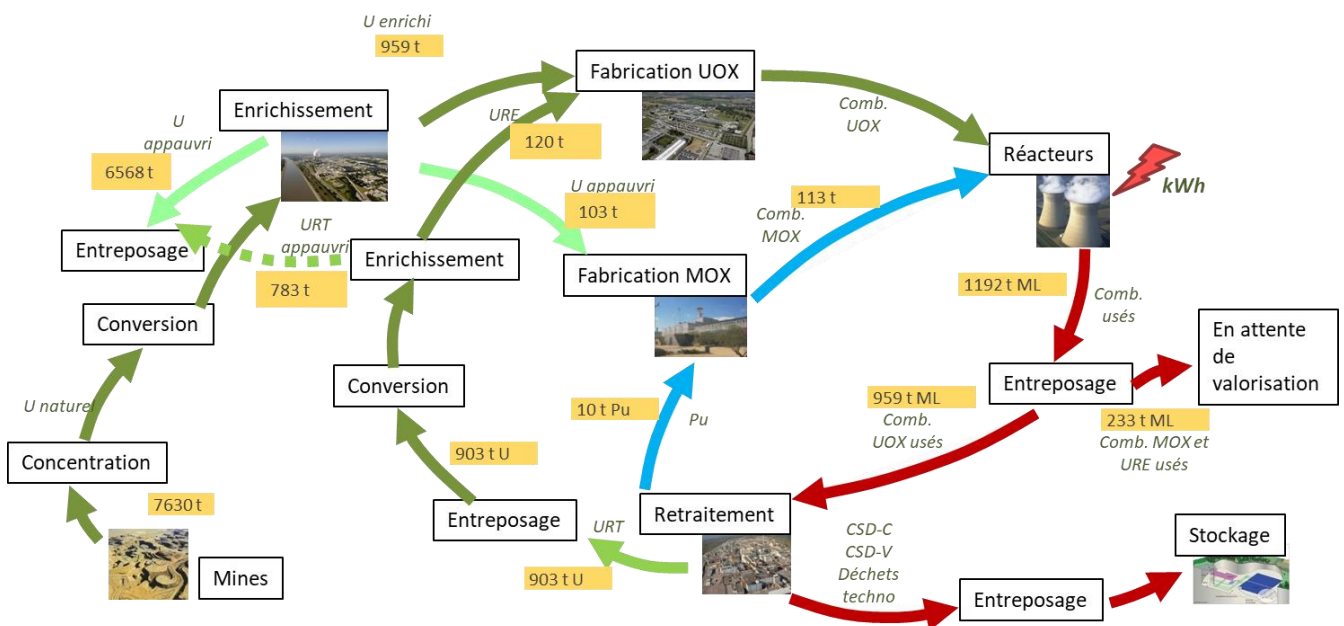


Figure 1 : schéma des flux annuels en cycle URT+Pu, source : EDF-Orano

Comme le montre le schéma ci-dessus, dans un cycle avec mono-recyclage URT+Pu, l'uranium naturel est extrait des mines, converti puis enrichi. Une fois enrichi, l'uranium est transformé en assemblage puis les assemblages sont chargés dans les réacteurs. **Toutes ces étapes constituent dans la présente étude les étapes "amont" du cycle URT+Pu.** Une fois irradiés, les assemblages sont traités pour séparer les matières valorisables (le plutonium et l'uranium de retraitement) des déchets ultimes (produits de fission, actinides mineurs et déchets métalliques de structure). Les produits de fission et les actinides mineurs sont ensuite vitrifiés pour devenir des déchets HA (CSD-V) entreposés en attente d'un stockage géologique à Cigéo. Les déchets métalliques sont compactés pour devenir des déchets MA-VL entreposés en attente d'un stockage géologique à Cigéo.

Le plutonium et l'uranium de retraitement séparés sont quant à eux valorisés en les utilisant pour fabriquer à nouveau des assemblages de combustible nucléaire.

Dans ce scénario, il est considéré que les combustibles MOX et URE usés sont des matières valorisables dont l'uranium et le plutonium peuvent être recyclés avec le déploiement du multi-recyclage à moyen terme dans les réacteurs de génération III actuel et à plus long terme, dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR) dans un objectif d'atteindre la fermeture du cycle. Dans cette étude, l'usage du multi-recyclage est considéré comme une "valeur d'option", ce qui signifie que leurs impacts potentiels ne sont pas inclus dans les résultats de l'analyse mais que les opportunités et éventuelles difficultés qu'ils soulèvent sont discutés.

Toutes ces étapes de traitement-recyclage du Pu et de l'URT, d'entreposage de combustibles usés et de stockage des déchets constituent l'aval du cycle URT+Pu dans cette étude.

2.2. / Scénario "transition vers un cycle ouvert"

Ce scénario, appelé "cycle ouvert" dans le reste du rapport, suppose qu'à partir de 2040, la France cesserait sa stratégie de traitement-recyclage et donc le traitement actuel des combustibles d'uranium naturel enrichi (UNE) usés. Cela implique que les réacteurs seraient uniquement alimentés par des combustibles UNE et que les installations de traitement-recyclage ne seraient pas renouvelées en 2040 (usine de La Hague et usine de Melox). Ainsi, l'aval du cycle ne comprendrait plus que des installations d'entreposage des combustibles UNE usés (en plus des combustibles MOX et URE usés déjà existants) dans l'attente de leur stockage géologique définitif puisque l'ensemble des combustibles usés seraient considérés comme des déchets.

L'amont de ce scénario ne se différencie pas de l'amont du scénario en cycle URT+Pu pour ce qui concerne le type et la localisation des installations mises en jeu (seuls les flux sont différents).

En cohérence avec les hypothèses posées dans l'ACV du CEA (2018)⁶, il est supposé que l'entreposage serait réalisé dans un centre d'entreposage centralisé sous eau quelque part au milieu de la France (pas d'hypothèse de localisation spécifique posée). Par ailleurs, l'objectif de résorption du stock d'URT à 2050 serait néanmoins maintenu, mais sans construction de nouvelles installations et d'un schéma industriel pérenne.

Le schéma ci-dessous reprend les différentes étapes du cycle ouvert avec les flux de matières associés :

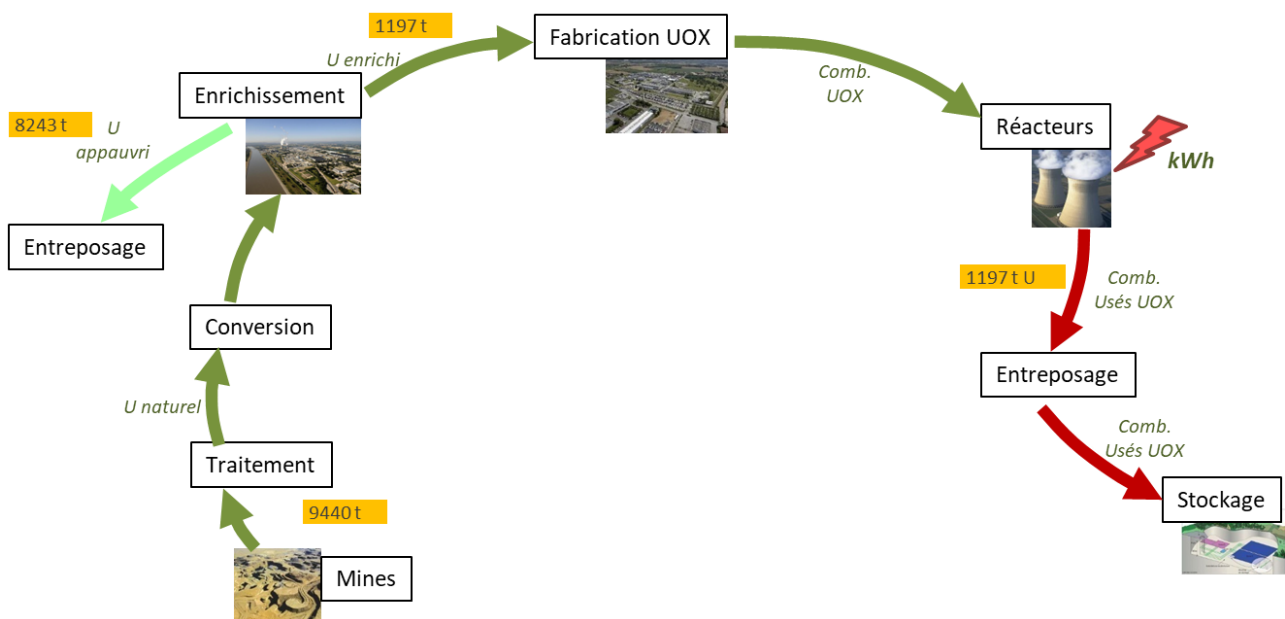


Figure 2 : schéma du cycle ouvert, source : EDF-Orano

⁶ CEA, EDF, Orano (2018). Analyse comparée du bilan environnemental d'un cycle électronucléaire « mono-recyclage Pu » et d'un cycle ouvert. PNGMDR 2016-2018 article 9.

En cycle ouvert, un système industriel plus court faisant appel à des besoins plus importants en ressources naturelles apparaît : l'uranium est extrait des mines en plus grande quantité (comme indiqué par les tonnages sur les Figure 1 et Figure 2) mais les étapes amont du cycle sont identiques à celles du premier scénario. Après utilisation en réacteur, les combustibles irradiés ne sont pas traités mais sont entreposés pour qu'ils refroidissent suffisamment longtemps en piscine (pendant 80 ans) avant d'être transférés vers le centre de stockage géologique Cigéo.

Dans ce scénario, il est considéré que l'objectif de multi-recyclage et *in fine* de fermeture du cycle en France serait abandonné.

2.3. / Synthèse des caractéristiques principales des scénarios comparés dans l'étude

Scénario	Etapes du cycle	Installations	Localisation considérée	Renouvellement des installations "aval de traitement-recyclage" actuelles vers 2040	Recyclage du plutonium et de l'uranium de retraitement
Poursuite du mono-recyclage	Amont du cycle	<ul style="list-style-type: none"> Mines Conversion Enrichissement Fabrication (UNE) 	<ul style="list-style-type: none"> Hors France Malvési/Tricastin Tricastin Romans/Isère 	OUI	OUI - mono-recyclage + en valeur d'option le multi-recyclage (en REP puis RNR)
	Production électrique	Réacteurs (parc actuel en VD6 sauf 12 tranches arrêtées en VD5 selon PPE2 + parc futur de 24 EPR2 (sur la base du scénario N2 RTE)	<ul style="list-style-type: none"> France 		
	Aval du cycle	<ul style="list-style-type: none"> Traitement Recyclage (URE/MOX) Entreposage CU/matières Stockage déchets 	<ul style="list-style-type: none"> La Hague Marcoule pour le MOX, Europe pour l'URE La Hague Bure (Cigeo) 		
Transition vers un cycle ouvert	Amont du cycle	Identiques au scénario de poursuite du mono-recyclage (seuls les flux de matières varient)	Identique au scénario de poursuite du mono-recyclage	NON - construction d'entrepôts centralisés en piscine	NON - arrêt du mono-recyclage actuel à compter de 2040. Ensuite, combustible UNE usé est un déchet
	Production électrique	Identiques au scénario de poursuite du mono-recyclage	<ul style="list-style-type: none"> France 		
	Aval du cycle	<ul style="list-style-type: none"> Entreposage CU Stockage déchets 	<ul style="list-style-type: none"> Centre de la France Bure (Cigeo) 		

Tableau 2 : synthèse des caractéristiques des scénarios comparés

3 / Protocole méthodologique

3.1. / Choix de la méthodologie d'évaluation

Deux approches méthodologiques ont été envisagées et étudiées en amont de l'étude : l'évaluation socio-économique (ESE) et l'analyse multicritère (AMC). Chacune de ces approches présente ses spécificités résumées dans cette section. Le choix de la méthodologie a reposé sur un arbitrage entre les forces et faiblesses des deux options et la pertinence des approches vis-à-vis des objectifs et du contexte de l'étude. Ce choix a été validé lors de la réunion du groupe de travail du PNGMDR qui s'est tenue le 5 juillet 2023.

3.1.1. - Principes de l'évaluation socio-économique

Dans un cadre budgétaire contraint, l'évaluation socio-économique constitue un outil d'aide à la décision publique permettant de s'assurer que les deniers publics sont engagés à bon escient. L'analyse coûts-bénéfices permet ainsi de déterminer si, compte tenu de son coût, un projet est suffisamment créateur de valeur.

La création de valeur est ici entendue dans un sens spécifique. Les bénéfices des projets ne se limitent pas aux recettes financières mais comprennent des bénéfices de nature économique, sociale, territoriale et environnementale. Par ailleurs, les personnes physiques et morales concernées vont bien au-delà du financeur. Une évaluation socio-économique permet ainsi de comparer l'ensemble des coûts socio-économiques (investissement, nuisances sonores, impacts environnementaux...) à l'ensemble des bénéfices socio-économiques (indépendance énergétique, emplois, développement de la R&D...) d'un projet, d'une politique ou d'une activité. Ce sont donc **l'ensemble des impacts, de toutes natures, pour toutes les parties prenantes et sur le temps long, qui sont considérés dans une évaluation socio-économique.**

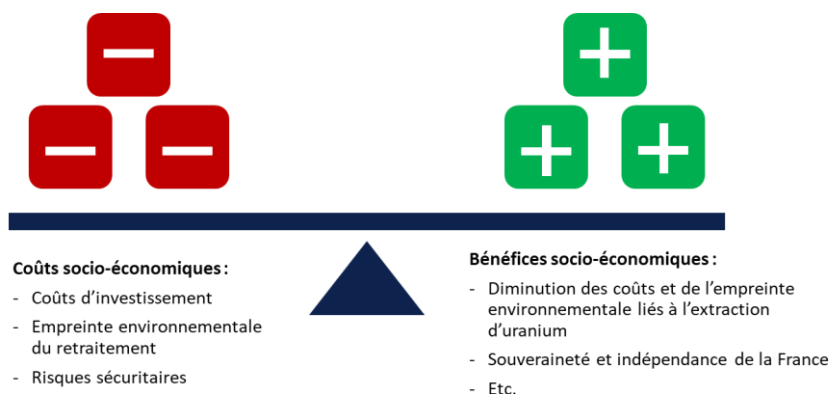


Figure 3 : principe de l'évaluation socio-économique, source : Citizing

La particularité de l'évaluation socio-économique repose sur le recours à l'exercice de monétarisation. A des fins de comparaison, l'ensemble des coûts et bénéfices sont exprimés dans une unité commune, l'unité monétaire. L'exercice de monétarisation pour des impacts non-monétaires est réalisé à partir de diverses techniques reconnues sur le plan académique (évaluation contingente, modèle de coût de transport, etc.). Une fois quantifiés et monétarisés, les impacts sont rapportés en valeur présente avec un taux d'actualisation afin de comparer les flux présents et futurs.

L'évaluation socio-économique est une analyse en différentiel, c'est-à-dire que les impacts du projet ou de la politique sont comparés à une situation dite "contrefactuelle" correspondant à la situation la plus crédible en l'absence de ce projet ou de cette politique.

A partir des estimations quantitatives et monétarisées, une valeur actualisée nette socio-économique (VAN-SE) est calculée. Celle-ci représente l'ensemble des gains socio-économiques actualisés net de l'ensemble des coûts socio-économiques actualisés. Une VAN-SE positive signifie que le projet ou la politique est souhaitable pour la collectivité.

3.1.2. - Principes de l'analyse multicritère

Il existe plusieurs approches pour réaliser une analyse multicritère (AMC). Cette méthodologie consiste à comparer deux ou plusieurs scénarios sur la base de critères d'étude définis. Ces critères peuvent être comparés aux impacts dans l'évaluation socio-économique. Cependant, l'AMC n'a pas vocation à monétariser les critères. Cet exercice peut être réalisé lorsque celui-ci est fiable et robuste mais il est possible de comparer des critères de nature différente sur la base d'une autre unité que l'unité monétaire (par exemple via des scores).

Une fois les scénarios définis et les critères d'étude identifiés, la performance de ces derniers est évaluée pour chaque scénario à partir de métriques quantitatives ou de scores définis dans le cadre de l'étude. Ces scores reposent généralement sur les opinions d'experts sur les différents sujets étudiés. Les résultats donnent lieu à une matrice de performance dans laquelle est résumée, pour chaque critère, la performance des différents scénarios sur la base des estimations chiffrées et des scores. Tous les critères peuvent être exprimés dans une même unité, par exemple au travers d'un score de 0 à 100.

Il est ensuite possible d'agrèger les scores des différents critères pour évaluer la performance globale d'un scénario. Cela requiert cependant de réaliser un travail de pondération afin de tenir compte de potentielles différences de sensibilité des parties prenantes entre les critères. Une fois l'importance relative de chaque critère considéré, un score de 0 à 100 peut être défini pour chaque scénario. Les scores de 0 à 100 s'interprètent toujours comme suit : plus le score est élevé, plus le scénario performe.

Les scores et la pondération ont pour but de rendre comparable des éléments qui ne sont pas exprimés dans les mêmes unités à l'origine. La matrice de performance donne une idée globale des résultats, au besoin par partie prenante si les opinions divergent, tandis que le résultat final agrégé détermine quelle option domine sur l'ensemble des critères identifiés. Des tests de sensibilité permettent d'explorer l'incertitude de paramètres, comme par exemple sur les valeurs des poids utilisées dans l'étape de la pondération.

3.1.3. - Forces et faiblesses des deux approches

L'évaluation socio-économique est une méthodologie reconnue au niveau institutionnel (contre-expertises d'évaluation socio-économiques de projets publics menées par le SGPI, guides de recommandations méthodologiques de France Stratégie) et au niveau académique (analyse coût-bénéfice). Son principe de monétarisation permet par ailleurs de comparer des effets de natures très différentes et ce, pour chacun des acteurs autour d'un projet.

En revanche, les résultats d'une évaluation socio-économique peuvent devenir fragiles et questionnables lorsque les techniques de monétarisation mobilisées sont incertaines. Il convient alors de privilégier une analyse qualitative des effets mais cette dernière n'est pas prise en compte dans la VAN-SE et peut être sous-estimée dans l'esprit des lecteurs de l'étude (décideurs publics notamment). De plus, l'explication de résultats socio-économiques, basés sur des comparaisons d'effets très différents de par leur nature, auprès d'un public non-initié requiert de la pédagogie.

L'analyse multicritère facilite le dialogue avec les parties prenantes car les effets peuvent être désagrégés, notamment dans la matrice de performance. Il est par ailleurs possible de tenir compte d'éventuels dissensus autour de certains effets, par exemple en exposant des résultats de performance par partie prenante, ce qui peut être particulièrement utile pour éclairer et alimenter un débat public. Une analyse multicritère peut être aussi bien quantitative que qualitative, ce qui permet d'aborder, avec un même degré d'importance, des enjeux dont les données sont indisponibles ou les hypothèses incertaines.

Les principales difficultés auxquelles fait face l'analyse multicritère sont l'absence d'une démarche méthodologique fixe et consensuelle, rendant la comparaison de résultats entre différentes études complexe, et une part de subjectivité importante dans l'analyse, tant sur le choix des scores que sur le poids accordé aux différents critères.

Sur la base des forces et faiblesses exposées pour chaque approche, **l'analyse multicritère a été retenue en réunion du GT du PNGMDR du 5 juillet 2023 pour mener cette étude**. Ce choix repose sur plusieurs raisons :

- Une pré-identification des enjeux du cycle a montré que de forts désaccords existent autour de plusieurs sujets, rendant la quantification des effets et la production d'une conclusion tranchée dans une évaluation socio-économique contestable et peu pertinente. L'AMC permet au contraire de récolter les opinions d'une variété d'experts et de parties prenantes ayant une bonne connaissance des différents sujets, ce qui permettra d'apporter de la nuance et constituera un support approprié pour alimenter le débat public de la PPE en 2024.
- Il a été identifié à ce stade de l'étude que des données seront très probablement manquantes, ce qui limitera la possibilité de quantifier certains enjeux. L'AMC n'étant pas vouée à tout quantifier (*a contrario* de la VAN-SE de l'ESE qui en dépend), cette approche permettra d'éviter le recours à des hypothèses dont le degré d'incertitude est élevé.
- De même, des enjeux seront par nature difficiles à quantifier et/ou monétariser, c'est le cas par exemple de la souveraineté ou encore des effets sur les écosystèmes.
- Bien que les deux approches soient utiles pour un débat public, l'AMC présenterait l'avantage d'être plus facilement accessible pour un public non-initié à l'exercice.

3.2. / Démarche de l'AMC

La démarche de l'analyse multicritère adoptée pour cette étude reprend celle exposée dans Dodgson et al. (2009) et suit différentes étapes décrites ci-dessous.

3.2.1. - Définition du cadre de l'étude

Il convient en premier lieu de définir le périmètre de l'étude et de poser les hypothèses structurant les deux scénarios étudiés (cf. sections 2.1. / et 2.2. / . Ce travail a été réalisé en étroite collaboration avec Orano et EDF au cours d'ateliers de travail avant d'être présenté et validé lors d'un groupe de travail du PNGMDR le 5 juillet 2023.

Le périmètre géographique retenu se limite aux enjeux pour la France, à l'exception des enjeux environnementaux dont certains peuvent être géographiquement globaux (émissions de GES notamment). L'horizon temporel considéré tient compte de tous les effets de l'activité du parc électronucléaire jusqu'à l'horizon 2100. Cela signifie que les effets de la production électronucléaire de l'année 2099 sont pris en compte, y compris les effets de long terme.

3.2.2. - Identification des critères

Plusieurs sources méthodologiques recommandent de définir les critères de l'analyse multicritère avec toutes les parties prenantes concernées par l'analyse. Dodgson, (2009) recommande par exemple d'identifier les parties prenantes à interroger en posant les questionnements suivants :

- Qui prend les décisions ?
- Qui est impacté par les décisions ?
- Est-ce que tous les critères inclus couvrent les aspects clés de la comparaison des scénarios entre eux (en particulier sur les aspects sociaux, territoriaux et économiques dont l'étude est spécialement visée par l'action POL.1 du PNGMDR 2022-2026) ?

Le choix de la stratégie française en termes de cycle du combustible est pris par le gouvernement, conformément aux dispositions légales en vigueur et en lien avec les différents industriels pour les aspects économiques et techniques, les autorités et institutions de régulation comme par exemple l'ASN, l'IRSN ou le HFDS qui contrôlent le maintien de la sûreté

nucléaire et la protection de la population contre les rayonnements ionisants, et le public qui est informé et consulté au travers de différents dispositifs ou cadres (PNGMDR, débats/enquêtes publics...).

Les personnes impactées par les décisions sont directement les exploitants, les centres de recherche (CEA, CNRS), les acteurs territoriaux sur les sites d'Orano à La Hague et à Marcoule (installations de traitement-recyclage) et sur le site hypothétique de l'entreposage centralisé en cycle ouvert, la population française de manière générale (prix de l'électricité, crainte du nucléaire, opinion sur la décision politique, etc.). Enfin, les institutions régulant les activités industrielles autour des enjeux de sûreté nucléaire et de radioprotection des travailleurs et du public ne sont pas directement impactées par le choix du cycle mais peuvent apporter leur expertise sur ces enjeux qui peuvent différer d'un scénario à l'autre. Ces parties prenantes sont ainsi identifiées comme étant neutre dans l'analyse.

Ces questionnements ont conduit à l'identification de parties prenantes spécifiques, d'horizons et de sensibilités diverses, à interroger pour identifier les critères pertinents de l'analyse multicritère. Le schéma suivant montre les parties prenantes retenues pour cette étape avec leur positionnement potentiel vis-à-vis du traitement-recyclage. Il convient de relever que des parties prenantes identifiées n'ont pas pu ou souhaité être interrogées, ce qui peut s'expliquer par la période de sollicitation tombée pendant les congés d'été (acteurs en gris ci-dessous).

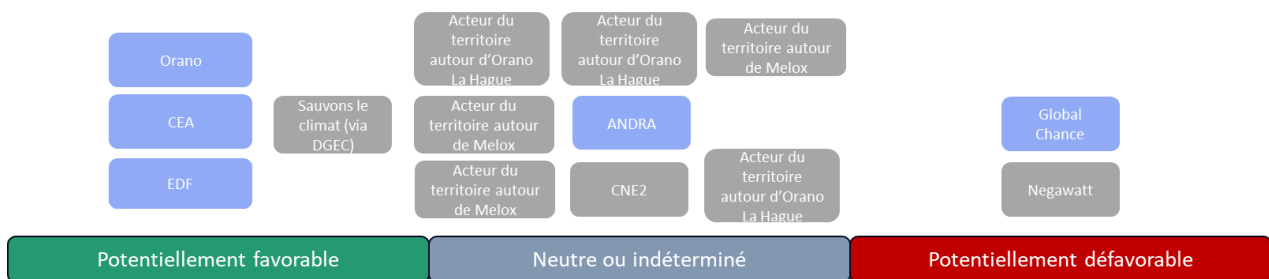


Figure 4 : parties prenantes sollicitées pour l'identification des critères, par positionnement vis-à-vis du traitement recyclage



Les différents entretiens menés auprès de ces différentes entités ont permis de cerner et comprendre les différents enjeux en lien avec la stratégie du cycle du combustible et en particulier le traitement-recyclage. En particulier :

- les échanges avec Orano ont permis de cerner plusieurs enjeux qui sont régulièrement évoqués au cours des débats sur le sujet tels que l'économie d'uranium naturel et la souveraineté, le risque de prolifération ou encore le conditionnement et la catégorie des déchets générés. Ils ont également permis de comprendre des enjeux techniques du traitement-recyclage et de discuter des enjeux environnementaux autour des installations d'Orano.
- les échanges avec EDF ont également permis de mieux comprendre les enjeux techniques et stratégiques du traitement du combustible usé, du recyclage du plutonium et de l'uranium et de la gestion des déchets.
- les entretiens avec le CEA ont apporté des éclaircissements sur les enjeux environnementaux (discussions autour de l'ACV réalisée dans le cadre du PNGMDR 2016-2018) et ont souligné l'importance de traiter l'enjeu de leadership, tant sur le plan scientifique qu'industriel. Des éléments de précision ont par ailleurs pu être apportés sur l'activité du CEA et son implication dans le cycle du combustible, distinguant notamment deux champs d'activité : le soutien aux industriels sur le cycle actuel et la recherche sur les technologies du futur (multi-recyclage en REP, RNR...).
- l'entretien avec l'ANDRA a permis d'aborder les sujets de stockage des déchets et les différences potentielles entre les deux scénarios.
- l'entretien avec Global Chance a confirmé la pertinence du choix de certains critères (prolifération, générations futures, environnement...) et a permis d'identifier deux enjeux supplémentaires : l'exposition des travailleurs aux rayonnements ionisants ainsi que les risques d'accidents graves. Ce dernier n'a toutefois pas été retenu par Orano et EDF dans cette étude dans la mesure où les activités d'Orano et EDF sont contrôlées et soumises à des exigences de sûreté strictes qui impliquent un niveau de risque proche de 0, quel que soit le scénario. De plus, la quantification de ces risques entre les deux scénarios aurait été trop longue et complexe dans la limite du temps imparti pour la réalisation de la présente étude.

D'autres sources ont également été mobilisées pour l'identification des enjeux : synthèses de débats publics (projet EDF de piscine d'entreposage centralisé à La Hague, débat public PNGMDR 2019-2021...), rapports institutionnels (CNE, Sénat, Cour des comptes, HCTISN), rapports d'activité (Orano), rapports académiques (ACV du CEA...) ou encore études à l'étranger.

Pour ces dernières, le CEPN a réalisé une enquête visant à identifier les approches retenues dans d'autres pays. Le cas britannique a fait l'objet d'une attention particulière en raison de son historique en matière de traitement du combustible usé à l'échelle industrielle. Le Royaume-Uni a en effet longtemps disposé à Sellafield d'installations de traitement du combustible usé. Le CEPN a, dans ce cadre, engagé des échanges avec l'Environment Agency (EA) qui a transmis plusieurs rapports d'intérêt dans le cadre de l'action POL.1 du PNGMDR, dont le rapport *Spent Fuel Management: Life Cycle Analysis Model* (NDA, Septembre 2007). Ce document, qui porte sur la comparaison de différents scénarios prospectifs pour l'aval du cycle électronucléaire britannique, appuie son analyse sur les critères (catégories d'impact) suivants :

- Impacts socio-économiques, portant principalement sur la création d'emplois ;
- Émissions de CO₂ ;
- Émissions de radionucléides et la quantification des impacts sanitaires associés. Les auteurs font preuve d'une grande prudence quant aux chiffres avancés en raison d'importantes incertitudes.

Le CEPN s'est également entretenu avec des représentants de la NDA (National Decommissioning Authority) au sujet du document *NDA's Value Framework* qui présente les facteurs ou critères de performance considérés par le NDA dans le cadre d'un processus décisionnel. Parmi les aspects/critères considérés, on relève en particulier :

- Santé et sécurité des individus : il s'agit de quantifier le potentiel de danger pour la santé humaine associé à une option considérée : exposition du public et des travailleurs aux substances dangereuses (radioactives ou non), dangers conventionnels (accident de la route par exemple), nuisances (bruit, poussières, etc.), etc. L'évaluation de ces risques est généralement une obligation réglementaire. Il s'agit donc ici d'évaluer les efforts nécessaires à la mise en œuvre d'une option (par exemple) dans un environnement sûr (du point de vue de la protection des travailleurs et du public).
- Sécurité (des installations) : les mesures de sécurité propres à une installation visent à contrer une variété de menaces : sabotage, espionnage, protection des informations sensibles, vol de matière, etc.
- Environnement : l'approche doit considérer l'impact sur l'environnement proche d'une installation (ou d'une zone) associé aux rejets de substances radioactives et non radioactives, et considérer également la production de déchets solides et la mise en œuvre des principes de la Waste Hierarchy. L'impact sur la qualité des eaux (de surface ou en profondeur) est également à considérer. A une échelle plus globale, il convient également de considérer l'utilisation des ressources naturelles, les rejets de gaz à effet de serre, etc. Au-delà de ces éléments, il peut également être utile d'investiguer une approche de type écosystémique. On retrouve dans cet item de nombreux sous-critères qui font l'objet d'une évaluation dans le cadre des études ACV du PNGMDR.
- Réduction du risque/danger : la réduction des risques et des dangers porte sur les facteurs qui entraînent une diminution du risque ou du danger après la mise en œuvre d'une option. Il s'agit donc, après avoir apprécié le risque actuel, d'évaluer le degré de réduction du risque pour les personnes après la mise en œuvre d'une option et le temps nécessaire pour atteindre ce niveau de réduction du risque (ampleur de la charge pour les générations futures). La réduction du risque peut être obtenue par exemple par la réduction de l'inventaire présent sur un site, par la passivation de l'inventaire ou par l'amélioration de l'état de l'installation, etc. Le risque et le danger doivent tous deux être pris en considération.
- Impacts socio-économiques : il convient, dans le cadre d'un processus décisionnel, de chercher à maximiser le bien-être social, économique et environnemental. Pour déterminer la valeur socio-économique d'une intervention, il est nécessaire de comprendre le territoire concerné. L'évaluation de l'impact socio-économique porte sur la création ou le maintien direct d'emplois, les impacts sur les entreprises existantes et futures, les infrastructures (transports, hôpitaux, écoles), etc.
- Coûts (lifetime costs) : l'évaluation des coûts n'intègre pas que les dépenses, mais également le potentiel de revenus. Par exemple, une option plus coûteuse qui permet une réutilisation plus rapide d'un site peut

présenter un avantage financier global par rapport à une option moins coûteuse avec une réutilisation différée du site en question.

Le document du NDA ne propose pas de facteur de pondération des différentes catégories d'impact qui, selon les auteurs, sont propres à chaque situation étudiée. Par ailleurs, certains des critères peuvent ne pas être considérés car non pertinents pour la situation étudiée. Il s'agit de présenter une évaluation rationnelle et contextualisée des différents aspects de la décision et d'en préciser les avantages et les inconvénients potentiels.

Une fois l'ensemble des enjeux identifiés au travers des entretiens avec les parties prenantes et des revues documentaires françaises et étrangères, des critères ont été définis. Plusieurs questions méthodologiques se sont alors posées :

- Les critères proposés représentent-ils l'ensemble des enjeux du cycle ?
- Y a-t-il des critères redondants ? Des critères superflus ?
- Est-il possible de mesurer la performance des scénarios sur la base de chaque critère ?
- Les critères sont-ils indépendants du point de vue des préférences des parties prenantes ? Si un critère était retiré, les scores des autres critères resteraient-ils inchangés ?
- Le nombre de critères est-il raisonnable ?

Pour chaque critère, des indicateurs ont ensuite été définis. Ces derniers ont vocation à être mesurés à partir de métriques quantitatives estimées dans la littérature (puis converties en un score par une fonction de valeur - cf. section suivante) ou à partir d'entretiens menés avec les parties prenantes (donnant lieu à des scores par entretien - cf. section suivante). Ces indicateurs doivent être exprimés de manière à refléter fidèlement les critères associés et à ne pas influencer les scores donnés en entretien. Pour cette raison, les indicateurs sélectionnés dans cette étude se veulent le plus neutre possible et donnent lieu à des réponses ouvertes. Certains indicateurs ont requis de la pédagogie au cours des entretiens pour éclairer les interlocuteurs mais cela a permis de ne pas orienter la réflexion en faveur d'un scénario ou d'un autre.

Chaque indicateur a mené à une réflexion sur l'unité de mesure (ex : tCO₂eq, m³, €, score) et la source d'information à mobiliser pour l'estimer. Ce travail a induit l'établissement de fiches critères tel que suggéré dans le guide méthodologique d'analyse multicritère formulé par l'IRSN⁷. Un point d'attention porte sur les sens d'interprétation des indicateurs qui peuvent être différents. Par exemple, un indicateur de coût financier est considéré comme décroissant car plus le coût est élevé, moins le scénario est "performant". Un indicateur d'emplois est en revanche croissant car plus le nombre d'emplois est important, plus le scénario est "performant". L'analyse des indicateurs ci-après est réalisée dans leur sens d'origine mais les résultats agrégés seront exprimés dans le même sens pour faciliter l'interprétation. Cela signifie que le score d'un indicateur décroissant sera converti de manière à être croissant pour harmoniser les conclusions de chaque indicateur. *In fine*, un indicateur d'une valeur plus élevée sera ainsi synonyme d'une performance plus élevée dans les résultats finaux.

3.2.3. - Estimation de scores de performance des indicateurs

L'analyse multicritère permet de mesurer et de comparer des indicateurs de nature très différente et dont la plupart sont difficiles à mesurer du fait de données incertaines, de l'absence de métrique ou encore de dissensus entre les parties prenantes. Pour pallier ces difficultés, la méthodologie propose d'établir des scores de performance sur ces indicateurs qui peuvent ensuite être agrégés au niveau des critères voire au niveau global (cf. section suivante sur la pondération).

Il existe pour cela plusieurs méthodes afin d'établir le score d'un indicateur. Les deux méthodes retenues dans la présente analyse sont les suivantes :

- La fonction de valeur

⁷ IRSN, (2022). Guide d'application d'une méthodologie d'analyse multi-acteurs et multicritère d'aide à la décision (AMAMC)

- L'évaluation directe par des experts et parties prenantes pertinentes

Score par fonction de valeur

Le score par "fonction de valeur" se base sur des méthodes sur lesquelles il existe un consensus scientifique pour mesurer la performance d'un scénario sur un critère. Par exemple, la performance d'un scénario sur le critère "émission GES", mesuré par les quantités d'émissions de GES, est estimée par des méthodes scientifiques d'analyse de cycle de vie (ACV) qui permettent cette quantification. Ce score est alors d'abord exprimé en tonnes de CO₂eq avant d'être projeté linéairement sur une échelle de 0 à 100. Un scénario pour lequel les émissions de GES sont plus élevées se rapprochera plus de 0 et inversement. Cette fonction de valeur est notamment mobilisée pour les critères économiques pour lesquels des métriques existent.

Score par entretien

Lorsqu'au contraire il n'existe pas de données fiables, de métriques reconnues ou qu'un indicateur est plus "subjectif" et ne fait pas l'objet de consensus entre les parties prenantes, la méthode "d'évaluation directe" est utilisée. Dans cette perspective, une seconde vague d'entretiens a été menée avec des parties prenantes sur les enjeux sociaux et sociétaux qui sont difficiles à objectiver à partir de données. En particulier, un panel de parties prenantes pertinent a été défini pour chaque sujet social ou sociétal à traiter afin de n'interroger que des experts ou des personnes ayant une bonne connaissance du sujet discuté.

Les parties prenantes à interroger ont été sélectionnées avec Orano, EDF et le CEPN qui ont une bonne vision de l'écosystème autour des enjeux du cycle. Compte tenu du calendrier, l'échantillon de personnes interrogées est limité mais la diversité des entités/organisations mobilisées permet d'obtenir une bonne représentativité de l'ensemble de cet écosystème (exploitants, centre de recherche, acteurs territoriaux, associations en faveur du nucléaire, associations contre le nucléaire, institut de régulation). Tel que décrit ci-dessus, un travail de *screening* a été mené afin de n'interroger que des parties prenantes ayant un niveau de connaissance important sur les sujets discutés avec ces dernières. Ce travail de répartition des sujets entre les parties prenantes s'est basé sur une revue de l'expérience des acteurs identifiés et sur une revue des publications/articles rédigés par les entités concernées afin d'identifier si ces dernières ont déjà travaillé sur les sujets d'intérêt.

Les entretiens menés et les parties prenantes sollicitées sont représentés dans la figure ci-dessous :

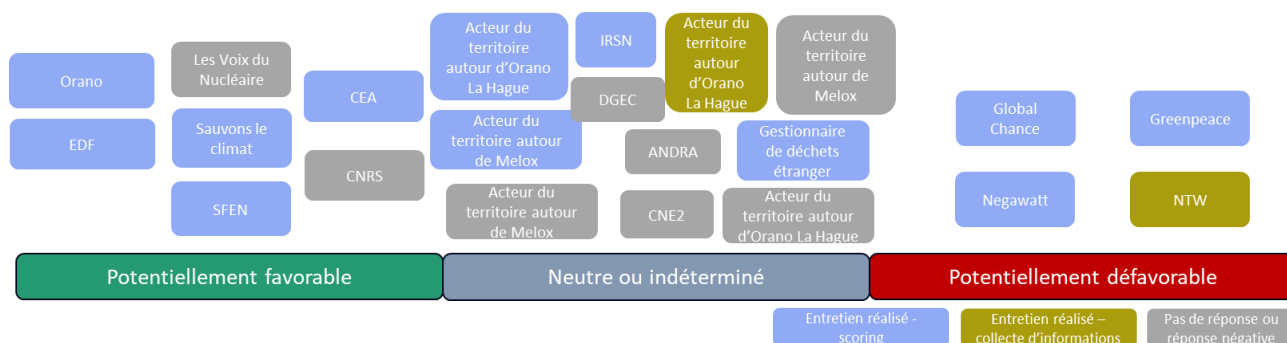


Figure 5 : parties prenantes sollicitées pour l'analyse des critères, par positionnement vis-à-vis du traitement recyclage

Les entretiens avec les parties prenantes exposées en gris n'ont pu être réalisés faute de réponse ou de réponse favorable. L'absence d'acteurs comme l'Etat, l'Andra ou encore la CNE2 parmi les répondants constitue une limite de l'étude car elle réduit le nombre d'acteurs neutres interrogés et le niveau de représentativité de l'écosystème.

A noter que certains entretiens n'étaient pas voués à établir des scores de performance mais à collecter de l'information et des données. C'est notamment le cas d'un acteur territorial autour de l'usine d'Orano La Hague qui a permis d'apporter des éclaircissements sur le poids économique d'Orano à La Hague. L'ensemble des acteurs territoriaux sollicités et interrogés sont anonymisés compte tenu du faible échantillon de ces derniers dans l'analyse.

Pour éliciter au mieux les préférences des parties prenantes interrogées à partir de scores, il a été décidé d'utiliser l'échelle de Loekart comprenant 7 niveaux : impact nul (0), impact très faible (1), impact faible (2), impact modéré (3), impact fort (4), impact très fort (5), impact extrême (6). Cette échelle à 7 échelons est recommandée dans la littérature afin d'obtenir le plus de fiabilité et de véracité dans les réponses des participants. Celle-ci est à la fois suffisamment large pour que les participants puissent nuancer leur réponse et suffisamment limitée pour leur permettre de considérer tous les scores possibles en même temps ou presque (*Taherdoost, 2019*). En effet, un individu ne peut, en moyenne, considérer simultanément plus de 6 éléments. Ainsi, un optimum découle de cet arbitrage entre un nombre d'options de réponse qui doit être grand pour permettre de la précision dans les réponses et un nombre limité pour ne pas "perdre" le répondant. L'échelle de 7 éléments permet également de centrer les réponses autour de l'impact "modéré". Les valeurs extrêmes ont vocation à lutter contre d'éventuels biais de prudence de la part des répondants. Ces derniers peuvent tout de même répondre "très fort" ou "très faible" s'ils n'osent pas donner une valeur extrême. Enfin, l'échelle qualitative a été privilégiée car considérée comme plus parlante pour les répondants.

Les entretiens étaient individuels afin de laisser place à la réflexion libre et d'instaurer un climat de confiance. Il a été considéré que des entretiens collectifs de type "concertation" auraient pu biaiser les scores de certains répondants de par l'influence des réponses des autres répondants et qu'il ne serait pas possible de rassembler les acteurs dans le calendrier imparti de l'étude. Par ailleurs, le répondant avait la possibilité de préparer l'entretien grâce au questionnaire transmis en amont. Il pouvait ajuster ses choix (si souhaité) à l'issue de la réunion après envoi d'un compte rendu complet contenant pour chaque indicateur, le score donné pour chaque scénario et l'argumentaire associé. Cela permettait également au répondant de s'assurer que ses arguments étaient bien compris et correctement retranscrits. La durée des entretiens, variait entre 1h et 2h selon le nombre de sujets abordés.

3.2.4. - Matrice de performance et agrégation des résultats

Deux niveaux de résultats sont estimés et affichés dans le présent rapport :

- Une matrice de performance désagrégée : représente le résultat de chaque critère pour chaque scénario. Ce résultat, qui agrège les indicateurs mais reste exprimé par critère, peut être exprimé quantitativement (métrique tels que l'unité monétaire ou le score pour les critères sociétaux) ou qualitativement (pour résumer une quantité importante d'information quantitative et qualitative)
- Un tableau de performance agrégé : représente les critères exprimés sous la forme d'un score de 0 à 100 afin qu'ils soient comparables, puis agrégés par famille de critères puis au global pour comparer directement les scénarios étudiés. Les conversions sur 100 reposent sur des hypothèses qui sont exposées dans la partie des résultats.

Par défaut, les poids accordés aux différents critères sont égaux dans l'analyse. Des tests de sensibilité sont néanmoins réalisés sur ces derniers. L'étape d'agrégation et de pondération n'est pas systématiquement mobilisée dans les analyses multicritère (Dogson et al., 2009). En effet, la matrice de performance constitue à elle seule un outil particulièrement utile pour éclairer et alimenter des débats publics. L'agrégation et la pondération apportent toutefois plus de précisions dans les résultats et permettent de dégager des tendances de dominance entre des scénarios, bien qu'elles puissent varier entre les parties prenantes lorsque des dissensus importants existent. Des entretiens complémentaires auraient pu être réalisés dans le cadre de l'étude afin de déterminer avec chaque partie prenante une pondération entre les critères et ainsi calculer un score agrégé plus représentatif des préférences des agents. Une telle démarche complémentaire n'était pas réalisable dans le périmètre calendaire de la présente étude. La littérature académique mobilisant l'analyse multicritère montre qu'un tel niveau d'analyse est généralement atteint sous un horizon temporel variant entre 1 et 2 années. Les résultats présentés dans le cadre de cette étude (analyses, matrice de performance et agrégation sous hypothèses) sont toutefois éclairants pour alimenter le débat public de la PPE et montrent le potentiel de la méthodologie pour l'étude des enjeux économiques, sociaux et sociétaux.

Il convient de préciser que certaines études vont jusqu'à l'étape de la pondération mais sans mener d'entretiens visant à dévoiler les préférences des parties prenantes sur l'importance relative des critères. A la place, des valeurs de poids arbitraires sont utilisées et des variations de ces valeurs sont faites pour vérifier si l'ordre de dominance des scénarios

est robuste (Diakoulaki et Karangelis, 2005 ; Brans et Vincke, 1985), ce qui s'aligne avec la démarche adoptée dans la présente étude.

3.2.5. - Tests de sensibilité

Des tests de sensibilité sont réalisés sur les paramètres incertains et sur les poids attribués aux différents critères afin d'évaluer la sensibilité des tendances de dominance entre les scénarios. Ces analyses complémentaires sont exposées dans la partie des résultats.

4 / Définition des critères

A la suite du travail d'identification des critères mené au travers d'entretiens et de revues documentaires, 12 principaux critères ont été retenus pour traiter l'ensemble des enjeux liés au "cycle", qu'ils soient environnementaux, territoriaux, sociaux ou économiques, en couvrant tous les aspects de gestion des matières et des déchets (objectif fixé par l'action POL.1 du PNGMDR pour cette étude). Il a été décidé de les classer sous 4 grandes familles : les critères financiers, les critères environnementaux, les critères territoriaux et les critères sociétaux. Chaque critère est défini et mesuré par un ou plusieurs indicateurs.

L'ensemble des critères est résumé dans l'arbre qui suit :

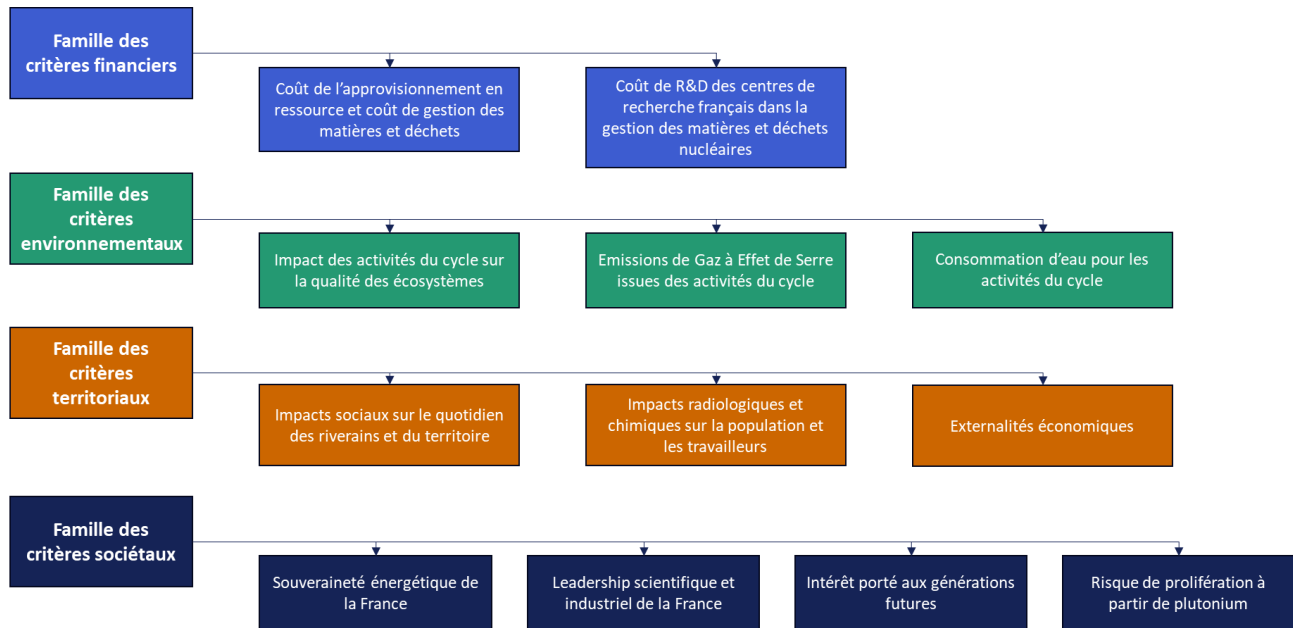


Figure 6 : arbre des critères de l'étude

Il convient de noter que certains sujets pourraient être traités au sein de plusieurs critères car multidimensionnels. Par souci de simplicité, chacun de ces sujets a été affecté à un unique critère qui est explicité dans cette section. C'est par exemple le cas de la valeur d'option du multi-recyclage en REP puis dans des RNR (telle que décrite dans la section 2.1. /) qui pourrait être étudiée sous l'angle des coûts, des impacts environnementaux, de la souveraineté ou encore des générations futures. Dans la mesure où ces technologies ne seront pas implantées industriellement avant la deuxième moitié du siècle, le sujet est traité dans le critère "intérêt porté aux générations futures" uniquement, afin d'éviter les doubles comptes et garantir l'indépendance des critères vis-à-vis des préférences des agents.

Cette section a pour but de présenter les définitions de chaque critère, leurs indicateurs associés et la méthode utilisée pour les mesurer. Ces éléments proviennent de "fiches critères" qui ont été réalisées dans le cadre de l'étude en s'inspirant du guide méthodologique d'analyse multicritère de l'IRSN (2022) et qui permettent de résumer pour chaque critère sa définition, ses indicateurs associés, sa méthodologie de mesure, son unité, etc.

4.1. / Critères financiers

Les critères financiers portent sur le coût du cycle dans chacun des scénarios étudiés et 2 critères sont en particulier analysés :

- Le coût de l'approvisionnement en ressource (en amont du cycle) et de gestion des matières et déchets (à l'aval) par unité d'énergie produite (kWh).
- Le coût de recherche et développement des centres de recherche français dans la gestion des matières et déchets nucléaires.

Le premier critère représente le coût de l'ensemble du cycle du combustible (à l'exception de la R&D considérée ici comme plus indirecte) : coût d'extraction de l'uranium naturel, coût de transformation, coût de conversion, coût d'enrichissement, coût de fabrication des assemblages, coût de traitement et recyclage des combustibles usés, coût d'entreposage, coût de stockage, coût des transports.

Ces coûts comprennent à la fois les coûts d'investissement (Capex) et les coûts d'exploitation (Opex). Ils peuvent être directement supportés par EDF mais certains le sont également par Orano et l'Andra puis se répercutent sur les coûts d'EDF. *In fine*, ces coûts ont une incidence sur le prix de l'électricité payé par les consommateurs et constituent donc un enjeu social et économique pour la société.

L'indicateur associé au premier critère est explicite et se définit simplement par le coût du cycle. Il peut être exprimé en euros, en pourcentage relatif entre les deux scénarios ou qualitativement selon la disponibilité et le niveau d'incertitude des données.

Le second critère concerne la R&D menée par les centres de recherche français, en particulier par le CEA et le CNRS. Les industriels sont également impliqués et financent une grande partie avec l'Etat. *In fine*, ces coûts d'investissement impactent également le prix payé par le consommateur pour l'électricité. L'indicateur est identique au critère et est exprimé en euros, en pourcentage relatif ou qualitativement selon la disponibilité et le niveau d'incertitude des données.

Ces deux critères sont dits "décroissants", c'est-à-dire qu'une valeur élevée de coût pour un scénario signifie que le prix de l'électricité sera élevé pour le consommateur ce qui rend le scénario moins avantageux.

4.2. / Critères environnementaux

La famille de critères environnementaux est divisée en trois critères :

- Emissions de gaz à effet de serre (GES) issues du cycle du combustible
- Utilisation d'eau pour les activités du cycle
- Impacts des activités du cycle sur les écosystèmes.

Le choix des indicateurs ainsi que leur quantification reprennent les résultats de l'ACV réalisée par le CEA en 2018 et portant sur la comparaison du cycle avec mono-recyclage du plutonium avec un cycle ouvert sur le parc de 2015. Une nouvelle étude comparative cycle URT+Pu et cycle ouvert, basée sur le parc actuel puis sur un scénario prospectif (futur parc EPR) est en cours et doit donner lieu à des résultats au premier trimestre 2024. Les résultats exposés et issus de l'ACV de 2018 sont donc limités pour refléter fidèlement les effets environnementaux dans le périmètre des scénarios et de l'horizon temporel considéré dans la présente étude. Ils sont néanmoins rappelés afin de donner de premières tendances sur ces enjeux entre un cycle avec mono-recyclage et un cycle ouvert.

Le critère relatif aux émissions de GES est exprimé en kilogrammes de CO₂ équivalent par MWh produit et comprend les activités de construction ou encore la consommation énergétique des usines en fonctionnement, etc.

Le critère relatif à l'utilisation d'eau est exprimé en m³ par MWh. Le principe de cet indicateur, qui est utilisé dans des analyses de cycle de vie, est de mesurer l'utilisation de l'eau prélevée qui n'est pas restituée dans l'environnement.

Le critère "impacts sur les écosystèmes" est mesuré dans l'ACV sur la base de 5 indicateurs :

- Niveau d'écotoxicité aquatique (t TEG/MWh)
- Niveau d'acidification aquatique (tSO₂/MWh)
- Niveau d'acidification terrestre (tSO₂/MWh)
- Niveau d'eutrophisation aquatique (tPO₄/MWh)
- Utilisation des terres reflétée par la surface des usines (ha/MWh)

Il convient cependant de préciser que les indicateurs liés aux écosystèmes présentent de nombreuses difficultés méthodologiques et ne font pas l'objet de consensus dans la littérature. Les résultats de l'ACV sont toutefois exposés dans le présent rapport à titre informatif.

L'ensemble de ces critères sont "décroissants" puisqu'ils constituent des impacts sur l'environnement qui doivent être limités pour qu'un scénario soit considéré comme plus performant.

4.3. / Critères territoriaux

Les enjeux territoriaux appliqués au périmètre de l'étude (France uniquement) concernent tous les territoires autour des installations du cycle du combustible hors infrastructures de recherche. Ces dernières sont principalement gérées par Orano, que ce soit à l'amont ou à l'aval du cycle. Seuls les réacteurs sont gérés par EDF et les centres de stockage par l'Andra. Cependant, il n'y a pas de différence en matière d'activités au niveau de l'étape des réacteurs entre les deux scénarios et trop d'incertitudes existent sur les différences territoriales autour de Cigéo entre les deux cycles.

S'agissant des installations d'Orano en France et des territoires associés, le choix méthodologique suivant a été pris : seuls les territoires autour des installations de l'**aval du cycle** d'Orano sont considérés. Cela comprend le territoire autour d'Orano La Hague (activités de traitement des combustibles usés) et celui autour d'Orano Melox (activités de fabrication du combustible MOX). Le(s) territoire(s) autour des activités de conversion et d'enrichissement de l'URT n'est (ne sont) pas considéré(s) car non connu(s). Si la filière URE actuelle fait appel à une installation de conversion hors Europe (Russie), il est supposé qu'une nouvelle filière purement européenne soit développée avec des installations toutes situées en Europe dont la France et ce, conformément aux travaux d'ores et déjà engagés par EDF pour le développement de cette dernière à moyen terme. En cycle ouvert, le territoire concerné par l'aval (activité d'entreposage des combustibles usés) n'existe pas aujourd'hui. Pour les besoins de l'étude, l'activité d'entreposage est supposé au milieu de la France et est incluse dans l'analyse bien que nourrie d'incertitudes importantes.

Les impacts territoriaux des installations de l'amont du cycle ne sont en revanche pas traités. Cette hypothèse méthodologique repose sur le raisonnement suivant : un passage en cycle ouvert n'aurait un impact que très limité sur les activités d'Orano en amont du cycle et il est impossible de déterminer quels contrats commerciaux seraient passés. EDF pourrait, en cycle ouvert, s'approvisionner auprès d'Orano ou bien d'autres fournisseurs pour obtenir le surplus d'uranium naturel converti et enrichi nécessaire. Par ailleurs, il n'est pas pertinent de supposer une perte d'activité des usines d'Orano de l'amont du cycle en cycle URT+Pu par rapport à un cycle ouvert liée à un volume d'uranium naturel moins important car Orano possède d'autres clients qu'EDF à l'étranger et une différence de 1810 tonnes d'uranium naturel traitées (cf. Figure 1 et Figure 2) est aisément absorbée dans un marché mondial de 50 000 tonnes annuelles et qui devrait augmenter jusqu'à 100 000 tonnes annuelles dans le siècle. Il est donc supposé l'absence d'effets territoriaux autour des usines de l'amont du cycle. En revanche, les coûts de l'amont du cycle supportés par EDF (critère financier) sont bien différenciants entre les deux scénarios.

Les différences en matière d'enjeux territoriaux reposent sur le fait que les installations d'Orano à La Hague et Marcoule sont renouvelées à horizon 2040 dans un scénario (cycle URT+Pu) mais pas dans l'autre (cycle ouvert) et qu'un centre d'entreposage est construit quelque part en France en cycle ouvert. Pour cette famille de critères, cela revient à comparer pour les territoires de La Hague et autour de Marcoule les critères territoriaux avec et sans les installations d'Orano et à comparer un territoire non-identifié avec et sans un centre d'entreposage.

3 types d'enjeux territoriaux sont étudiés :

- Les impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires
- L'impact radiologique et chimique sur la population
- Les externalités économiques

Le premier critère vise à étudier les externalités sociales (hors santé) des activités des installations de l'aval du cycle sur les riverains et de manière plus globale pour les territoires. Plusieurs types d'externalités sont ainsi distingués : les

nuisances des activités (trafic routier, bruit, luminosité nocturne), l'influence sur la qualité du paysage, le ressenti de la population (craintes éventuelles sur la présence d'installations nucléaires) et l'impact sur l'image et le rayonnement du territoire. Ces 6 dimensions constituent des indicateurs permettant de mesurer le critère.

Ces indicateurs sont évalués au moyen de scores sur l'échelle de Loekart, déterminés au cours d'entretiens avec des acteurs territoriaux, et sont complétés par des données mobilisables.

Le second critère met en avant les enjeux sanitaires liés au cycle du combustible. Ces enjeux se décomposent en 3 indicateurs : l'impact radiologique des activités sur la population locale, l'impact radiologique sur les travailleurs et l'impact chimique sur la population.

Ces impacts radiologiques et chimiques potentiels pourraient découler des rejets des usines et des expositions des travailleurs à des radiations dont les niveaux peuvent varier selon le scénario. Ce critère est mesuré à l'aide des données publiques de dosimétrie et qualitativement. Ce sujet a été discuté en entretien avec des parties prenantes mais sans aboutir à un score retenu pour l'analyse.

Enfin, les externalités économiques des activités de l'aval du cycle sont étudiées. En particulier, trois dimensions économiques sont analysées : l'emploi, la valeur ajoutée générée et les retombées fiscales pour l'Etat et les territoires. Le nombre d'emplois comprend l'emploi direct (travailleurs dans les usines de traitement-recyclage et dans le site d'entreposage), l'emploi indirect (travailleurs chez les prestataires et fournisseurs) et l'emploi induit (effets d'entraînement via la consommation des travailleurs des usines dans les commerces du territoire permettant d'augmenter le nombre d'employés de ces derniers). La valeur ajoutée comprend également la valeur ajoutée directe (issue de l'activité d'Orano), indirecte (activités des prestataires/fournisseurs) et induite (activités liées à la consommation des travailleurs d'Orano). La valeur ajoutée capture notamment le niveau de qualification de la main d'œuvre employée sur le territoire⁸. Enfin, les retombées fiscales proviennent des achats d'Orano auprès de fournisseurs et de sous-traitants pour les activités de l'aval du cycle. Le premier indicateur est calculé en nombre d'emplois tandis que les deux derniers sont exprimés en unité monétaire.

Le critère d'impacts sociaux sur les riverains et le territoire et celui d'impact radiologique et chimique sont tous deux "décroissants" car des externalités sociales ou sanitaires plus élevées pour un scénario signifient que ce dernier est moins favorable. Les externalités économiques sont en revanche un critère "croissant" puisque des niveaux de retombées économiques plus élevés rendent un scénario plus favorable.

4.4. / Critères sociétaux

Certains critères ci-dessus peuvent être considérés comme des enjeux sociétaux. La classification des critères telle qu'elle a été établie constitue une possibilité parmi d'autres et a été jugée comme étant la plus claire et pertinente pour l'étude. Les enjeux rangés dans cette famille de critères sont des enjeux globaux pour la société (à l'échelle de la France dans cette étude). Ils sont les plus subjectifs compte tenu de la difficulté à les mesurer et/ou des forts sujets de dissensus existants entre les parties prenantes sur ces critères. L'analyse multicritère est particulièrement utile pour traiter de tels enjeux car elle permet de les mesurer au travers de scores et en tenant compte de la diversité d'opinions entre les acteurs. Ces critères sont ainsi mesurés au travers des entretiens qui ont été menés, à la fois quantitativement (scores définis à partir de l'échelle de Loekart) et qualitativement (arguments des acteurs). Les résultats sont ensuite complétés par un état de l'art de la littérature.

La famille des critères sociétaux est composée de 4 critères :

- Souveraineté énergétique de la France
- Leadership scientifique et industriel de la France
- Intérêt porté aux générations futures
- Risque de prolifération à partir de plutonium séparé non irradié

⁸ Une main d'œuvre plus qualifiée implique théoriquement des salaires plus élevés, augmentant ainsi la valeur ajoutée.

Le critère de souveraineté énergétique représente la capacité de la France à assurer la continuité de sa production énergétique indépendamment des pays étrangers. Cet enjeu est étudié sous deux angles : le niveau d'indépendance en matière d'approvisionnement en combustible nucléaire et le niveau de fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique.

Le premier indicateur reflète la résilience de la France face à des ruptures dans la chaîne d'approvisionnement de l'uranium (potentiellement causées par des conflits géopolitiques ou des chocs économiques). Le second indicateur se caractérise par un niveau de risque de ruptures dans la chaîne du cycle du combustible. Une chaîne de production qui n'est pas fiable et qui s'interrompt entraîne un risque d'arrêt des réacteurs nucléaires et un recours accru de la France aux importations d'électricité, la rendant moins souveraine.

Le critère relatif au leadership de la France représente le niveau scientifique et industriel de la France dans la gestion des matières et déchets nucléaires (procédés avancés pour le retraitement, entreposage, stockage, multi-recyclage et développement de nouvelles technologies pour la fermeture du cycle comme les réacteurs à neutrons rapides, etc.) par rapport à celui des autres pays. Il se présente sous trois indicateurs : le niveau de compétence humaine (nombre et niveau des diplômés), le niveau de la recherche technologique (brevets, partenariats industriels, publications) et le rayonnement de la France à l'international (poids des centres de recherche français dans la communauté scientifique, poids des industriels dans les relations internationales...).

L'intérêt porté aux générations futures est par définition très vaste. Dans le cadre de l'étude, deux dimensions sont susceptibles de varier entre les deux scénarios et sont étudiées : volume et catégorie des déchets radioactifs laissés aux générations futures et niveau probable des technologies et de la compétence industrielle laissées à ces mêmes générations.

Limitier aujourd'hui la quantité de déchets radioactifs (notamment les plus dangereux) contribue à favoriser le bien-être des futures générations auxquelles nous laissons moins de déchets à gérer. Cet enjeu de limitation des déchets s'inscrit dans le cadre général de l'objectif de développement durable numéro 12 (consommation et production responsable) : « d'ici à 2030, réduire considérablement la production de déchets par la prévention, la réduction, le recyclage et la réutilisation » (ODD 12.5). La pyramide « hiérarchie des déchets » indique par ailleurs que la prévention (éviter la production de déchets) doit être préférée à l'élimination.

Le premier indicateur est séparé en deux sous-indicateurs dans l'analyse : 1) volume et catégorie de déchets et 2) dangerosité des déchets. Des données sont apportées à l'analyse afin d'objectiver ces indicateurs. Néanmoins, ces données font l'objet de forts désaccords entre les parties prenantes et le niveau d'intérêt porté aux générations futures en matière de limitation de déchets radioactifs est une dimension subjective, justifiant le choix d'interroger les parties prenantes sur le meilleur cycle au regard de ces sujets.

La bonne gestion des matières et déchets radioactifs par les futures générations dépendra par ailleurs des technologies, installations et connaissances qu'elles posséderont (réacteurs à neutrons rapides, procédés de retraitement, d'entreposage, de stockage...). Le niveau de ces technologies, visant à favoriser les conditions des générations futures, dépend des moyens de R&D mis en œuvre dès aujourd'hui. La valeur d'option mentionnée dans la section 2 / est discutée dans cet indicateur. En cas de fermeture du cycle (cf. hypothèse du scénario URT+Pu), cela aurait des implications pour le bien-être des générations futures (souveraineté, gestion des déchets, etc.).

Enfin, le dernier critère "risque de prolifération à partir de plutonium" correspond au niveau de risque de prolifération par un autre Etat ou d'une utilisation de plutonium par une organisation ou des individus pour des usages malveillants. Ce niveau de risque dépend à la fois du stock de plutonium séparé non irradié présent en France et de son accessibilité dans les différentes matières et différents déchets.

Les critères de souveraineté et de leadership sont "croissants", le critère de risque de prolifération est "décroissant" et le critère d'intérêt porté aux générations futures est à la fois "décroissant" (niveau de déchets et dangerosité) et "croissant" (niveau technologique et de compétence laissé).

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des critères et leurs indicateurs associés.

Famille	Critère	Indicateur	Unité
Financier	Coût du cycle	Coût du cycle (CAPEX + OPEX)	€
	Coût de R&D	Coût de R&D	€
Environnemental	Emissions de GES du cycle	Quantité d'émission de GES	kgCO2eq / MWh
	Utilisation d'eau pour le cycle	Volume d'eau utilisé	m ³ / MWh
	Impacts sur les écosystèmes	Ecotoxicité aquatique	t TEG / MWh
		Acidification aquatique	tSO2 / MWh
		Acidification terrestre	tSO2 / MWh
		Eutrophisation aquatique	tPO4 / MWh
Utilisation des terres (surface des usines)	ha / MWh		
Territorial	Impacts sociaux sur le quotidien des riverains et du territoire	Trafic routier	Score de 0 à 6
		Bruit	
		Luminosité nocturne	
		Influence sur la qualité du paysage	
		Craintes sur la présence d'installations nucléaires	
		Image du territoire	
	Impacts radiologiques et chimiques sur la population	Impact radiologique sur la population locale	mSv
		Impact radiologique sur les travailleurs	mSv
		Impact chimique	N.A.
	Externalités économiques	Nombre d'emplois directs, indirects et induits	emplois
Valeur ajoutée directe, indirecte et induite		€	
Retombées fiscales		€	
Sociétal	Souveraineté énergétique de la France	Niveau d'indépendance pour l'approvisionnement de combustible nucléaire	Score de 0 à 6
		Fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique	Score de 0 à 6
	Leadership scientifique et industriel de la France	Niveau de compétence humaine	Score de 0 à 6
		Niveau de R&D	Score de 0 à 6
		Rayonnement à l'international	Score de 0 à 6
	Intérêt porté aux générations futures	Volume et dangerosité des déchets laissés	Score de 0 à 6
		Niveau des technologies et de compétence industrielle laissées (valeur d'option notamment)	Score de 0 à 6
	Risque de prolifération à partir de plutonium	Niveau de risque de prolifération	Score de 0 à 6

Tableau 3 : récapitulatif des critères et indicateurs de l'étude

5 / Analyse des critères

Les différentes analyses menées sur chacun des critères sont présentées ci-dessous. Une synthèse des principaux éléments de la littérature est en premier lieu proposée pour l'ensemble des critères. En cas d'analyses quantitatives ou qualitatives complémentaires, la méthode mobilisée est détaillée et les résultats sont exposés. Ces études complémentaires sont nourries par des données récoltées dans le cadre de la démarche ou bien par des entretiens avec les parties prenantes. Dans le dernier cas, un résumé des principaux arguments avancés par les parties prenantes accompagne les résultats chiffrés, exprimés sous forme d'un score de 0 à 6. Les analyses sont présentées critère par critère et sont synthétisées et agrégées par famille de critères dans la section suivante (cf. section 6 /).

5.1. / Famille de critères financiers

Les critères financiers sont des critères pour lesquels la méthode de quantification retenue est la fonction de valeur et ne dépend donc pas d'entretiens avec des parties prenantes. Néanmoins, l'avis de certaines parties prenantes a été récolté sur le sujet, notamment afin de récupérer de l'information qualitative sur le critère "coût de R&D" pour lequel peu de données précises sont disponibles.

5.1.1. - Coûts du cycle

En raison d'un manque de données, il n'a pas été possible de chiffrer le coût complet de chacun des deux cycles dans le cadre de cette étude. A toutes fins utiles, une revue de la documentation est exposée ci-dessous. Celle-ci fournit des tendances et montre que si le cycle dit "fermé" semble plus cher que le cycle ouvert, ce résultat présente toutefois des nuances qu'il convient d'apporter : la différence entre les deux cycles est faible, généralement non significative du point de vue statistique et le résultat est soumis à une forte incertitude. Il n'y a, à ce jour, pas assez d'informations pour être en mesure de déterminer dans le temps imparti de la présente étude le cycle le plus compétitif. Une étude économique actuelle et prospective appropriée pourrait permettre d'éclairer le débat sur ce sujet.

Revue documentaire

Le coût du cycle du combustible fait l'objet d'une littérature académique éprouvée dans le monde mais produit des résultats différents selon le pays étudié et les hypothèses posées, notamment sur les caractéristiques des cycles dits "fermés" qui sont comparés à un cycle ouvert. En effet, le cycle "fermé" peut correspondre à un cycle Pu, un cycle URT+Pu, à un cycle avec multi-recyclage en REP, à une partie du parc avec RNR, à un parc 100% RNR ou encore avec transmutation. Ces études analysent des cycles ouverts très similaires à celui exposé dans le présent rapport avec parfois des méthodes d'entreposage différentes.

Charpin, Pellat, Dessus (2000) avait pour mission d'étudier d'un point de vue économique le choix entre un cycle de mono-recyclage de l'uranium et du plutonium et un cycle ouvert. Les auteurs estiment que l'aval du cycle en cycle URT+Pu est 26% plus cher qu'en cycle ouvert. Sur la partie stockage uniquement, Charpin, Pellat, Dessus considèrent qu'il faut stocker les combustibles usés UNE, ainsi que les combustibles URE et MOX usés existants dans le scénario cycle ouvert. Ils formulent l'hypothèse que la durée de vie des installations est de 41 ans et estiment la quantité de déchets générée de 1977 jusqu'à la fin de la durée de vie des réacteurs en activité considérés pour l'exercice (soit 2050). Ces hypothèses les mènent à la conclusion d'un surcoût pour le stockage en cycle ouvert, de l'ordre de 34 GF (milliards de francs) par rapport au cycle URT+Pu⁹. En supposant une augmentation modeste du cours de l'uranium (de 300F à 400F le kg¹⁰), ils évaluent que les coûts en amont du cycle sont 4% plus chers sans traitement-recyclage. Les auteurs expliquent cela par l'économie d'uranium naturel permise par le recyclage des matières valorisables issues du retraitement des combustibles usés, de l'ordre de 5% (aujourd'hui estimé à 20% par EDF et Orano).

⁹ 34 GF correspond à 7.48 milliards d'euros (en euro 2022).

¹⁰ 300F correspond à 64.11 euros (en euro 2022) et 400F correspond à 85.49 euros (en euro 2022).

Au global (cumul des coûts de l'amont et de l'aval), les experts concluent que l'arrêt du traitement permettrait une économie de 28 à 39 milliards de francs¹¹, ce qui correspond à une différence de 1% de coûts non-actualisés par kWh entre les deux cycles, à l'avantage du cycle ouvert moins cher. Cette différence, relativement faible, s'explique par des effets de compensation à différentes étapes du cycle et par le fait que les coûts d'investissement pour les réacteurs constituent la principale composante du coût par kWh. Comme mentionné ci-dessus, ces résultats sont toutefois soumis à l'hypothèse que le MOX et l'URE usés sont stockés dans Cigéo. L'absence de ces matières dans l'inventaire de référence de Cigéo, considérées aujourd'hui comme matières valorisables, réduirait encore la différence de coût et pourrait inverser la tendance. Le calcul économique ajustant ces hypothèses à celles de la présente étude ne peut être réalisé compte tenu de l'absence de données disponibles. Les auteurs précisent par ailleurs que ces résultats sont à manier avec une grande prudence, notamment car les coûts de stockage des combustibles usés (UOX, URE et MOX) étaient incertains à l'époque.

Bien que le cadre de l'étude de Charpin, Pellat, Dessus diffère de celui de la présente étude, il constitue celui qui s'en rapproche le plus et fournit un résultat intéressant qui est prudemment retenu pour la suite de l'analyse.

Taylor et al. (2022) ont réalisé une revue des articles académiques qui traitaient de la question du choix économique entre des cycles dits fermés (mono-recyclage du Pu, RNR, transmutation) et un cycle ouvert. Les critères sur lesquels sont évalués les cycles dans les différentes études mises en avant sont en général des critères économiques, environnementaux et sociétaux.

Les conclusions principales montrent que le coût à l'aval du cycle est un composant mineur des coûts de l'ensemble de l'industrie du nucléaire, que la différence de coûts entre les cycles dits fermés et le cycle ouvert n'est pas significative (intersection des intervalles de confiances des coûts) et que le coût d'investissement pour les réacteurs représente 60 à 70% des coûts totaux de la production électronucléaire (coût ne variant pas entre les cycles URT+Pu et ouvert).

Il est à noter que les retombées économiques territoriales tels que les emplois ou encore la génération de valeur ajoutée ne sont pas pris en compte dans les études recensées par Taylor et al.

Etape du cycle	Extraction uranium	Enrichissement	Conversion et fabrication UOX	Réacteurs (investissement, maintenance, démantèlement)	Aval du cycle
Pourcentage des coûts totaux (€/MWh) de la production électronucléaire	4.8%	3.3%	1.4%	87.3%	3.2%
Facteur par lequel les coûts par étape doivent être multiplié pour engendrer une augmentation de 20% des coûts totaux de production électronucléaire	5.2	7	15	<i>Non communiqué</i>	7.3

Tableau 4 : coûts des étapes du cycle en % des coûts totaux, source : Taylor et al. (2022)

Le tableau ci-dessus montre la répartition des poids de chaque étape du cycle dans le coût total de la production électronucléaire estimée dans Butler et al. (2017)¹² et repris dans Taylor et al. (2022). A noter que le type de cycle considéré dans ce tableau n'est pas indiqué. Il est toutefois précisé que le coût de l'aval représente une proportion faible du coût total que le cycle soit ouvert ou fermé (ici seulement 3% du coût total), ce qui s'accorde avec les conclusions de la plupart des études (Collins et al., 2012 ; NEA, 2013 ; Zhou et al., 2014 ; Rodríguez et al., 2014 ; Gao et al., 2017). Cela

¹¹ Soit entre 5.98 et 8.33 milliards d'euros (en euro 2022).

¹² Butler, G.; Hesketh, K. Choosing the Right Nuclear Power Systems. In Nuclear Future; Cornell University Press: Ithaca, NY, USA, 2017; pp. 50–56.

s'explique notamment par le principe de l'actualisation. Au travers d'un taux d'actualisation, les flux futurs ont moins de poids que les flux présents. Dans le calcul des coûts du cycle, les coûts liés à l'aval sont des coûts de long terme contrairement aux coûts de l'amont, ce qui explique la faible proportion de ces premiers dans le coût global du cycle. Tel que mentionné ci-avant, la majorité des coûts repose par ailleurs sur l'investissement dans les réacteurs. L'étude montre également que pour une variation du coût global au MWh considérée comme significative (soit 20%), les coûts de l'aval doivent être multipliés par plus de 7. Ce résultat confirme que le coût de l'aval n'est pas un facteur déterminant sur le coût global de la production électronucléaire.

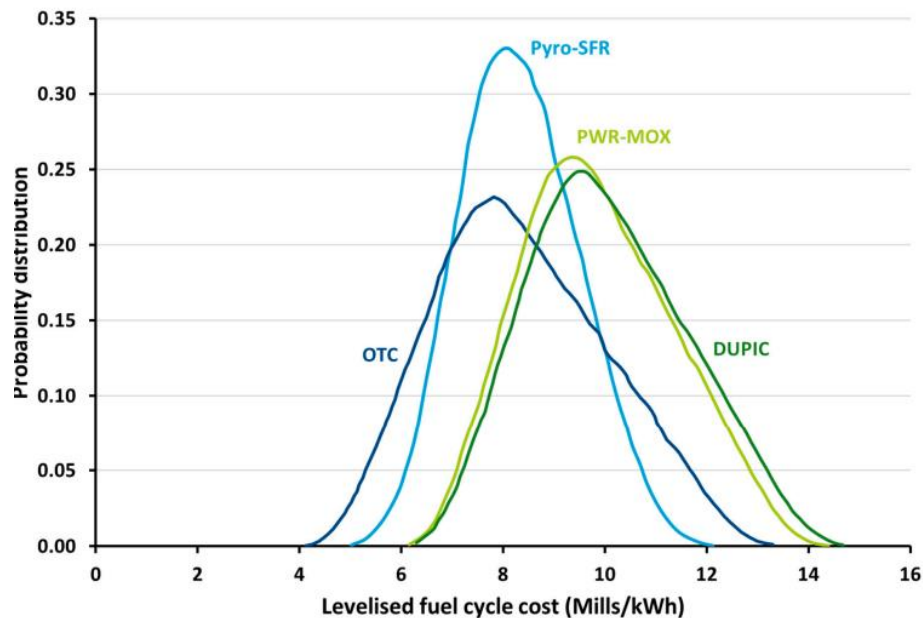


Figure 7 : courbe de densité de l'ensemble des coûts du cycle de différents scénarios par simulation de Monte Carlo¹³, source : Taylor et al. (2022)

Les auteurs reprennent par ailleurs une étude de Ko et al. (2012)¹⁴ et mettent en avant le graphique ci-dessus qui présente les distributions de coûts pour différents scénarios de cycle après des simulations de Monte Carlo. "OTC" correspond au cycle ouvert, "PWR-MOX" correspond au mono-recyclage Pu, "Pyro-SFR" à un cycle avec des RNR et la transmutation et "DUPIC" (Direct Use of PWR fuel in CANDU) au multi-recyclage dans un réacteur à eau lourde.

Les courbes s'intersectionnent toutes entre elles sur une large surface, montrant que la différence des coûts n'est pas statistiquement significative¹⁵. Ces résultats nécessitent d'être contextualisés : l'étude a été réalisée en Corée du Sud en 2010, inclut le coût des réacteurs et applique un taux d'actualisation de 5%. Les résultats pourraient par ailleurs varier en fonction du prix de l'uranium naturel.

Les conclusions, **bien que non statistiquement significatives et à prendre avec précaution**, sont toutefois intéressantes et montrent que le cycle avec mono-recyclage du Pu est 20% plus cher que le cycle ouvert et que le cycle RNR + transmutation est 5% plus cher que le cycle ouvert (ces résultats correspondent aux valeurs moyennes par cycle, obtenues dans les simulations). Le cycle RNR + transmutation est en revanche moins cher que le cycle avec mono-recyclage. Ce dernier résultat surprenant peut s'expliquer par le contexte particulier de l'étude exposé ci-dessus.

D'autres études sélectionnées par Taylor et al. présentent des résultats de coûts globaux de production électronucléaire basés sur des données européennes. Ces résultats sont exposés dans la figure ci-dessous :

¹³ Une courbe de densité est une courbe qui attribue aux valeurs en abscisse une probabilité. Une simulation de Monte Carlo est un tirage aléatoire.

¹⁴ Ko, W., II; Gao, F. Economic Analysis of Different Nuclear Fuel Cycle Options. Sci. Technol. Nucl. Install. 2012, 2012, 293467

¹⁵ Les coûts sont exprimés en Mills/kWh dans cette étude, ce qui revient à exprimer le coût en dollars/MWh. En effet, un « mill » équivaut à 1/1000 U.S. dollar.

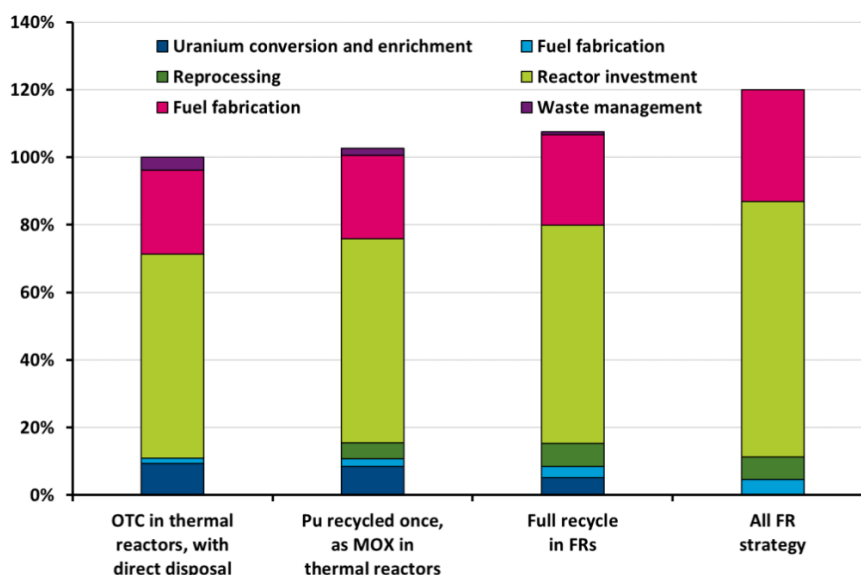


Figure 8 : coûts normalisés aux coûts du cycle ouvert pour diverses options de cycles fermés, source : Taylor et al. (2022)

Ces conclusions proviennent des études de l'EASAC (2014)¹⁶ et de NEA (2006)¹⁷ et montrent une nouvelle fois la dominance du coût des réacteurs et la faible différence entre le cycle ouvert et un cycle avec mono-recyclage qui n'est pas statistiquement significative (de l'ordre de quelques pourcents en moyenne). Il est également souligné que les résultats reposent sur d'importants niveaux d'incertitudes, notamment sur les données utilisées et les hypothèses posées. Des études complémentaires de sensibilité montrent par ailleurs une faible sensibilité du coût global au coût de stockage géologique mais une forte dépendance au prix de l'uranium.

Bien que très variables d'une étude à l'autre, les coûts globaux des cycles ouverts et avec mono-recyclage ne semblent pas être un critère déterminant dans le choix du cycle. Les tendances montrées dans les études se rapprochant du présent cadre d'analyse indiquent que le cycle ouvert pourrait être moins onéreux que le cycle avec mono-recyclage de quelques pourcents mais que cette différence n'est pas significative et surtout très incertaine.

Il conviendrait idéalement de mener une étude approfondie au cas de la France dans un contexte plus récent que celui de la dernière étude réalisée dans le pays (début des années 2000) mais cela requiert des données précises qui ne pouvaient être recueillis dans le cadre de cette analyse. En attendant une prochaine étude sur le sujet, les principaux résultats extrapolables de la littérature académique sont retenus et des premiers éléments indicatifs sont apportés en complément ci-dessous.

Analyse des données existantes en France

A l'amont, un cycle ouvert requiert un volume d'activité plus important pour Orano pour répondre aux besoins du parc EDF du fait d'une quantité plus élevée d'uranium naturel à extraire, convertir et enrichir et d'un nombre d'assemblages UNE à fabriquer supérieur par rapport au cycle URT+Pu, ce qui a une incidence sur le coût supporté par EDF. Le cycle ouvert est ainsi défavorable sur cette partie du coût car il ne profite pas de la réutilisation de la matière valorisable contenue dans les combustibles usés. Pour rappel, les flux d'uranium naturel pour le parc français (renseignés en détail sur la Figure 1 et la Figure 2 du présent document) sont les suivants : 7 630 tonnes d'uranium naturel extrait en cycle URT+Pu contre 9 440 tonnes en cycle ouvert (Orano/EDF).

Sur la partie aval du cycle, un niveau d'activité plus important est réalisé en cycle URT+Pu qu'en cycle ouvert puisque certaines de ces activités ne sont présentes que dans le premier scénario : traitement des combustibles usés à La Hague, valorisation des matières radioactives et conditionnement des déchets ultimes en CSD-V et CSD-C, fabrication de

¹⁶ EASAC. Management of Spent Nuclear Fuel and Its Waste; EASAC (European Academies Science Advisory Council):Halle, Germany, 2014.

¹⁷ NEA. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management; NEA (Nuclear Energy Agency OECD): Paris, France, 2006.

combustibles MOX et combustibles URE. En cycle ouvert, seule une activité d'entreposage est réalisée avant le stockage. Cependant, cette dernière est plus importante qu'en cycle URT+Pu.

Il y a donc des effets de sens différents sur les coûts de l'aval du cycle entre les scénarios avec d'un côté, des coûts d'investissement et de fonctionnement d'usines de traitement-recyclage et d'entreposage et de l'autre, des coûts d'investissement et de fonctionnement d'une activité importante d'entreposage.

	Cycle ouvert	Cycle URT +Pu
Flux de CU (tMLi/an)		
UNE usés	1197	
MOX usés		113
URE usés		120
Masse de CU accumulés en fin de refroidissement avant stockage (tMLi)	95 740	26 631
Nombre cumulé de piscines supplémentaires pour l'entreposage des CU	19.1	5.3

Tableau 5 : quantité de combustibles usés (CU) à entreposer (en tMLi) et nombre de piscines par cycle, source : données Orano/EDF

Les données d'Orano et EDF montrent que si le cycle ouvert ne nécessite pas un renouvellement des installations à La Hague et à Melox, des investissements sont en revanche nécessaires pour construire régulièrement (au fil de l'augmentation du besoin) un nombre important de piscines (environ 19 au terme de la durée de vie du parc actuel¹⁸). Il est à noter qu'en cycle URT+Pu, des entreposages doivent également être construits à mesure de l'accumulation croissante dans le temps de combustibles MOX et URE irradiés en attente d'une solution de valorisation (5 piscines au terme de la durée de vie du parc) et de déchets CSD-V et CSD-C en attente de stockage définitif. Ces données ne considèrent pas le prochain parc EPR2 (étude à venir dans le cadre d'une nouvelle ACV en cours). Les combustibles usés du prochain parc et le nombre de piscines supplémentaires pour les entreposer dans chacun des scénarios ne sont par conséquent pas comptabilisés dans la présente étude, ce qui constitue une limite à l'analyse. Compte tenu du manque de cette donnée dans le calendrier de l'étude et par souci de simplicité pour l'analyse, la masse finale de combustibles usés accumulés (cf. tableau ci-dessus) est retenue dans le reste du rapport, tout en précisant que celle-ci arrivera progressivement.

Il existe également un effet sur le coût du stockage. Celui-ci est ambigu en regardant uniquement les volumes de déchets mais pourrait s'éclaircir en portant attention à l'emprise au stockage de ces derniers. Cette emprise dépend du niveau d'activité du déchet et de sa puissance thermique. On distingue plusieurs types de catégories de déchets nucléaires : très faible activité (TFA), faible à moyenne activité à vie courte (FMA-VC), faible activité à vie longue (FA-VL), moyenne activité à vie longue (MA-VL) et haute activité (HA). Selon la catégorie de déchets à stocker qui est considérée, un cycle peut performer mieux qu'un autre. Un cycle ouvert génère par exemple peu de déchets MA-VL comparé au cycle URT+Pu puisque ces déchets sont issus du traitement des combustibles usés (gainés du combustible, boues issues du traitement...) et de la maintenance des installations nucléaires (incluant Orano La Hague et Melox). En revanche, le cycle ouvert génère un volume plus important de déchets HA par rapport au cycle URT+Pu (volume de combustibles usés en cycle ouvert supérieur au volume de CSD-V en cycle URT+Pu). S'agissant des déchets TFA, FMA-VC, et FA-VL, les différences sont très faibles d'un cycle à l'autre. L'ANDRA indiquait dans l'une de ses notes¹⁹ que les capacités de stockage des TFA sont actuellement de 650 000 m³ pour 353 000 m³ stockés en 2020. Une demande d'extension a récemment été déposée pour un horizon 2040-2045 (en cohérence avec la prise en charge des déchets issus du démantèlement des installations arrêtées), quel que soit le scénario de cycle. La capacité de stockage des déchets FMA-VC est de 1 000 000

¹⁸ Les hypothèses de calcul sont les suivantes : 5000 tonnes de CU par piscine et un temps d'entreposage de 80 ans pour les UOX et de 150 ans pour les MOX.

¹⁹ ANDRA, (2021). Projet nouveau nucléaire français. Evaluation sur l'impact des filières de gestion de déchets.

m³, avec un autre centre prévu à horizon 2070. Bien que le cycle URT+Pu génère moins de déchets FA-VL que le cycle ouvert, cette différence ne semble pas discriminante.

Les volumes de déchets et de matières générés dans chaque cycle pour chaque catégorie sont exposés dans le tableau ci-dessous.

Type de déchet ou matière / an	Cycle URT + Pu	Cycle ouvert
TFA en m ³	26 165	26 330
FMA-VC en m ³	14 363	14 696
FA-VL en m ³	980	1 052
MA-VL en m ³	694	215
HA - CSD-V en m ³	113	0
HA - CU en m ³	115 (MOX et URE usés)	591

Tableau 6 : volumes annuels²⁰ de déchets et matières valorisables, source : CEA, Orano

Les MOX et URE usés ne sont cependant pas considérés comme des déchets dans le scénario URT+Pu de la présente étude et donc ne sont pas voués à être stockés à Cigéo. En cycle ouvert, il convient de noter que tous les assemblages MOX et URE usés ainsi que les CSD-V et CSD-C générés jusqu'en 2040 devraient être stockés à Cigéo. En cycle URT+Pu, seuls des colis CSD-V et CSD-C seraient stockés dans Cigéo. La différence de volume de déchets HA apparaît ainsi plus marquée entre les deux scénarios que celle affichée dans le précédent tableau.

Le volume à lui seul n'est que peu pertinent pour estimer le coût du stockage puisque chaque catégorie de déchet implique des niveaux de radioactivité et de thermique différents en fonction de leur durée d'entreposage, ce qui a une influence sur l'emprise de stockage. Aucune étude récente et suffisamment robuste n'a pu être identifiée pour développer ce sujet.

La différence de coûts de stockage entre les deux cycles demeure par conséquent incertaine et pourrait être conditionnelle à l'hypothèse de valorisation des combustibles MOX et URE usés avec l'atteinte du multi-recyclage en réacteur à eau pressurisée (MRREP) à horizon 2050 puis une fermeture du cycle avec les RNR à plus long terme.

5.1.2. - Coûts de R&D

A l'instar des coûts du cycle, il n'a pas été possible de chiffrer l'exhaustivité des coûts de R&D des deux scénarios dans le temps imparti pour l'étude. Quelques éléments sur le sujet ont pu être recueillis à partir de la revue documentaire et des entretiens menés avec le CEA.

Revue documentaire

Les budgets R&D du CEA et du CNRS dédiés au cycle du combustible nucléaire n'ont pas pu être identifiés. La recherche de ces centres est financée au moyen de subventions de l'Etat mais également par les industriels.

Les budgets des industriels alloués à cette recherche, et en particulier à la recherche pour l'aval du cycle (plus sensible à un changement de cycle), ne sont pas non plus publics. Quelques données sont toutefois mobilisables. EDF a par exemple investi un total de 473 millions d'euros en 2022 dans la R&D, toutes énergies confondues²¹. Orano a investi en 2022 126 millions d'euros dans la R&D sur le cycle du combustible²². Bien qu'une partie de cette recherche soit cependant dédiée à l'amont du cycle du combustible nucléaire (peu susceptible de varier entre les deux scénarios), à effort de R&D similaire entre l'amont et l'aval, les coûts de R&D de l'aval seront beaucoup plus importants du fait des conditions de manipulation plus sévères (haute activité). Enfin, l'Andra a alloué la même année 134 millions d'euros à la

²⁰ Note : le volume de certaines catégories de déchets est brut, c'est notamment le cas des combustibles usés (volume des assemblages). D'autres sont en revanche exprimées en volume de colis de déchet conditionné comme le CSD-V (calcul de la densité prend en compte la masse de verre et de l'enveloppe du CSD-V).

²¹ EDF. R&D oser le futur.

²² Orano, (2023). Rapport annuel d'activité 2022.

R&D. Une partie de ces 134 millions d'euros a été financée par les industriels, complétée par des subventions de l'ordre de 5 millions d'euros²³.

Bien que peu précis, ces éléments permettent de situer des ordres de grandeur sur les montants investis dans la recherche et le développement du cycle aujourd'hui.

Résultats des entretiens

Les entretiens menés avec le CEA, acteur majeur de la R&D française sur le cycle du combustible, permettent d'apporter des éclaircissements complémentaires.

Le CEA, dans le cadre de son programme "Cycle Nucléaire", intervient sur l'amont du cycle et trois axes relatifs à l'aval du cycle : soutien aux usines de La Hague et Melox pour leur fonctionnement, développement de procédés innovants pour le multi-recyclage du plutonium en REP ou en RNR et études prospectives. Ces dernières visent à simuler des scénarios de déploiement de nouveaux parcs de réacteurs (REP, RNR voire AMR) et de nouvelles usines du cycle afin de mettre en avant l'impact de ces options sur la gestion des matières et déchets et éclairer le choix des décideurs publics. Ces études n'impliquent pas une volumétrie financière importante mais n'en demeurent pas moins essentielles.

Le soutien au cycle actuel constitue une forte activité pour le CEA. Le second axe représente une volumétrie d'activité moins importante mais tout de même significative.

En effet, 60% de la R&D du CEA pour le cycle nucléaire est dédié à l'accompagnement des industriels et 40% à la recherche et au développement des technologies de traitement-recyclage du futur. Cette dernière inclut la recherche sur les procédés du cycle pour le multi-recyclage en réacteur à eau pressurisée (REP) et en réacteurs à Neutrons Rapides (RNR).

En cas de transition vers un cycle ouvert à horizon 2040, les entretiens ont mis en avant que la R&D sur le traitement-recyclage et les technologies du futur (second axe) diminuerait très fortement dans les années à venir car si cette option de cycle était retenue, un retour en arrière serait peu probable. Le CEA accompagnerait néanmoins les industriels jusqu'à la fermeture des usines en 2040 (premier axe) puis cesserait ce soutien lorsque les exploitants n'en auraient plus l'utilité.

La recherche sur le stockage et l'entreposage pourrait s'accélérer en cycle ouvert mais ne compensera pas la baisse de la recherche sur le traitement-recyclage. Par ailleurs, il existe déjà de la recherche sur le stockage direct des combustibles usés puisque cette option est prise en compte par l'ANDRA, quel que soit le scénario.

Ces éléments montrent que le coût investi dans la R&D est donc plus élevé en cycle URT+Pu qu'en cycle ouvert. Les ordres de grandeur sont toutefois à mettre au regard des coûts du cycle, bien plus importants.

A retenir sur la famille des 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

²³ ANDRA, (2023). Rapport financier 2022.

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.

5.2. / Famille de critères environnementaux

Les critères environnementaux sont étudiés en profondeur dans l'étude de type "analyse de cycle de vie" réalisée par Orano, EDF et le CEA (2018) dans le cadre du PNGMDR 2016-2018 et comparant le cycle avec mono-recyclage du plutonium (sans recyclage de l'URT) par rapport au cycle ouvert sur le parc de 2015. Une étude complémentaire est en cours et vise à comparer un cycle avec mono-recyclage du Pu et de l'URT avec un cycle ouvert sur le parc actuel et sur un futur parc électronucléaire. Les résultats seront connus au premier trimestre 2024. La présente étude des enjeux socio-économiques, environnementaux et territoriaux n'a pas vocation à développer davantage les analyses menées par Orano, EDF et le CEA. Afin d'alimenter les critères environnementaux sélectionnés pour l'analyse multicritère, les principaux résultats de l'étude CEA sur le parc 2015 sont exposés bien que découlant d'un cadre d'étude différent (Orano, EDF et CEA, 2018).

A noter que seuls les résultats de l'étude liés aux impacts sur l'environnement sont présentés dans cette partie. Cela concerne l'indicateur d'émission de gaz à effet de serre, l'indicateur d'utilisation d'eau et l'ensemble des indicateurs mesurant l'impact des activités humaines sur les écosystèmes. Ces derniers sont complexes et à prendre avec précaution. Les résultats des indicateurs relatifs aux déchets radioactifs sont mobilisés plus tard dans le critère "intérêt porté aux générations futures". Les indicateurs "Appauvrissement de la couche d'ozone", "Toxicité humaine", "Emissions de particules" et "Rayonnement ionisant" ne sont pas considérés ici car ces effets sont analysés dans la présente étude au niveau local autour des usines concernées (cf. critères territoriaux).

5.2.1. - Emissions de GES

La méthodologie de calcul pour l'indicateur changement climatique figure parmi les plus fiables et consensuels des indicateurs ACV.

L'ACV réalisée par Orano, EDF et le CEA sur le parc nucléaire de 2015 estime que l'ensemble du cycle Pu (mono-recyclage du plutonium) entraîne des émissions de GES de l'ordre de 3.72 kg de CO₂ équivalent par MWh en moyenne contre 3.71 kg CO₂eq par MWh en cycle ouvert, soit une différence de 0,1%. En cycle Pu, près de 12% des émissions proviennent de l'aval dont environ 10% imputables aux étapes de traitement-recyclage et 2% à l'entreposage et au stockage. En cycle ouvert, près de 7% des émissions sont issues de l'aval (entreposage et stockage).

Le tableau ci-dessous permet de comparer ces résultats aux autres sources énergétiques :

Source d'énergie	Emissions en kgCO ₂ eq/MWh
Nucléaire - cycle Pu	3.72*
Nucléaire - cycle ouvert	3.71*
Gaz	418
Fioul	730
Charbon	1 060
Hydraulique	6
Eolien en mer	15
Eolien terrestre	14
Géothermie	45
Panneaux photovoltaïques (fabriqués en Chine)	43
Panneaux photovoltaïques (fabriqués en Europe)	32
Panneaux photovoltaïques (fabriqués en France)	25

Tableau 7 : intensité carbone des sources d'énergie, source : base carbone ADEME et pour (*) ACV 2018 Orano-EDF-CEA²⁴

En moyenne, les centrales à charbon émettent ainsi près de 300 fois plus qu'un cycle nucléaire Pu, à production égale d'électricité. Il est possible de constater par ailleurs que le nucléaire émet moins de GES que les énergies renouvelables.

Il n'y a ainsi pas de différence entre les deux cycles en termes d'émissions de GES. L'étude ACV en cours de réalisation par Orano, EDF et le CEA permettra d'étudier la question des émissions de GES pour un cycle URT+Pu en considérant l'économie supplémentaire de ressources naturelles et la diminution des activités minières permises par le mono-recyclage de l'URT. L'ACV de 2018 montre en effet que le poste d'émissions le plus important de la production d'énergie nucléaire est celui des mines et du traitement du minéral.

5.2.2. - Utilisation d'eau

Dans un contexte d'intensification des sécheresses en France et dans le monde, le partage et l'usage raisonné de l'eau est devenu un sujet d'ampleur dans l'hexagone.

Les résultats de l'étude Orano, EDF et CEA (2018) montrent que le cycle mono-recyclage Pu utilise autant d'eau que le cycle ouvert : 1,48 m³/MWh environ.

Par ailleurs, l'étude montre qu'environ 97% de cette utilisation d'eau provient de l'activité des réacteurs, quel que soit le cycle considéré. Cela explique la faible différence entre les deux cycles dans la mesure où la production d'électricité et l'activité des réacteurs est similaire dans les deux scénarios (productible équivalent et le MOX n'a pas d'incidence sur le fonctionnement des centrales).

N'ayant pas de différence entre les deux cycles considérés, le critère utilisation d'eau n'est pas discriminant dans l'analyse multicritère.

5.2.3. - Impacts sur les écosystèmes

La nature procure à l'humanité divers services appelés « services écosystémiques ». Cette notion se définit comme la contribution des écosystèmes au bien-être humain, qui découle de l'interaction des processus biotiques et abiotiques. Ces services « rendent la vie humaine possible, par exemple en fournissant des aliments nutritifs et de l'eau, en régulant

²⁴ ANALYSE COMPAREE DU BILAN ENVIRONNEMENTAL D'UN CYCLE ELECTRONUCLEAIRE « MONORECYCLAGE PU » ET D'UN CYCLE OUVERT, PNGMDR 2016-2018 article 9, Décembre 2018

les maladies et le climat, en contribuant à la pollinisation des cultures et à la formation des sols et en fournissant des avantages récréatifs, culturels et spirituels » (FAO). La biodiversité englobe la diversité au sein des espèces et des écosystèmes. Les changements qui surviennent dans la biodiversité peuvent avoir un effet sur la fourniture des services écosystémiques.

L'estimation des impacts des activités humaines sur les écosystèmes dans les études environnementales (ACV et autres) sont complexes. Les nombreuses interactions entre les écosystèmes et la multitude de facteurs les influençant (transformation des habitats, changement climatique, espèces envahissantes, surexploitation, pollution...) complexifient l'identification de liens de causalité. De ce fait, la littérature académique n'est pas consensuelle sur les méthodologies à appliquer et leur efficacité, et notamment concernant l'effet des rejets radioactifs et chimiques des activités nucléaires dans l'environnement. On distingue dans l'étude d'Orano, EDF et CEA (2018) cinq indicateurs communément utilisés et qui reflètent l'impact des activités des cycles sur les écosystèmes :

- Ecotoxicité aquatique : impact sur les organismes d'eau des substances toxiques émises dans l'environnement. L'indicateur est exprimé en tonnes de triéthylène glycol (TGE).
- Acidification aquatique : acidification potentielle de l'eau due au rejet de gaz tels que les oxydes d'azote et les oxydes de soufre (exprimée en tonnes de SO₂) pouvant entraîner des phénomènes de pluies acides²⁵.
- Acidification terrestre : acidification potentielle des sols due au rejet de gaz (également exprimée en tSO₂).
- Eutrophisation aquatique : enrichissement de l'écosystème d'eau douce ou d'eau marine en éléments nutritifs, en raison de l'émission de composés contenant de l'azote ou du phosphore (exprimé en tonnes de phosphate - PO₄). Un enrichissement excessif des milieux naturels peut entraîner une asphyxie d'une zone et la mort d'espèces.
- Utilisation des terres : peut caractériser un impact sur la biodiversité lié à l'artificialisation des sols. L'indicateur est mesuré par la surface occupée par les usines du cycle (en hectare par MWh produit).

Les résultats de l'étude d'Orano, EDF et du CEA (2018) sont exposés ci-dessous mais sont à prendre avec des précautions. Il est préférable de porter attention sur la différence entre les deux scénarios, plus que sur les valeurs en elles-mêmes.

Indicateur ACV (/MWh)	Unité	Cycle Pu	Cycle ouvert
Ecotoxicité aquatique	t TEG	0,4033	0,3769
Acidification de l'eau	tSO ₂	0,000055	0,000058
Acidification des sols	tSO ₂	0,000138	0,000141
Eutrophisation aquatique	tPO ₄	0,00000124	0,00000129
Surface des usines	ha	0,00002057	0,00002188

Tableau 8 : estimation des indicateurs d'impact sur les écosystèmes, source : ACV du CEA (2018)

En vert est indiqué le scénario qui présente la valeur d'indicateur la plus faible (autrement dit, le scénario qui performe le mieux). Le cycle Pu présente ainsi des valeurs plus faibles que le cycle ouvert au global. L'indicateur écotoxicité aquatique potentielle découlant des activités du cycle constitue l'exception et est plus élevée en cycle Pu. Cette différence reste cependant particulièrement faible. La majorité des contributions aux indicateurs proviennent des activités minières et des réacteurs, expliquant pourquoi le résultat du scénario Pu est sensiblement plus favorable. Cependant, compte tenu des très faibles écarts et des très faibles ampleurs, il n'est pas possible de conclure de manière définitive, et ce critère est par conséquent jugé non-discriminant dans la présente analyse multicritère.

²⁵ Méthode de l'Analyse du Cycle de Vie - principes clés - Documentation AGRIBALYSE®

A retenir sur la famille des 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 équivalentes en cycle ouvert et en cycle Pu (3.71 kgCO₂eq/MWh en cycle ouvert contre 3.72 kgCO₂eq/MWh en cycle Pu) 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.

L'utilisation d'eau est également équivalente entre les deux cycles. A l'instar des GES, 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 indicateurs ACV relatifs aux impacts sur les écosystèmes sont complexes et nécessitent d'être pris avec précaution. Cependant, une interprétation en relatif (entre un cycle Pu et un cycle ouvert) est possible dans la mesure où les indicateurs des deux cycles sont estimés à partir des mêmes méthodes. En différentiel, les résultats montrent des valeurs relativement faibles avec une tendance en faveur du cycle Pu à l'exception de l'écotoxicité aquatique. Compte tenu des très faibles écarts et des très faibles valeurs, il n'est toutefois pas possible de conclure avec certitude sur le meilleur des deux scénarios.

L'analyse réalisée par Orano, EDF et le CEA en 2018 porte uniquement sur le parc "actuel" (année de référence en 2015) et compare un cycle avec mono-recyclage du Pu avec un cycle ouvert. Une étude comparant un cycle ouvert avec un cycle mono-recyclage du Pu et de l'URT sur le parc actuel et sur un futur parc EPR est en cours et permettra de compléter les résultats présentés ci-dessus.

5.3. / Famille de critères territoriaux

Les critères territoriaux visent à traiter des enjeux locaux autour des installations du cycle du combustible. Ces enjeux peuvent être économiques ou sociaux. Tel qu'explicité dans la section 4.3. / , ces critères portent uniquement sur l'aval du cycle et en particulier sur le territoire autour de l'usine d'Orano à La Hague, celui autour de l'usine d'Orano Melox et un territoire non-identifié au milieu de la France qui, suivant les hypothèses de travail qui ont été posées, accueillerait un centre d'entreposage en piscine en cycle ouvert. Les trois critères territoriaux proposés sont étudiés sous des approches différentes :

- les impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires sont estimés à partir de scores déterminés en entretien avec deux acteurs territoriaux et complétés par des données et éléments qualitatifs, en particulier pour le cycle ouvert dont le territoire concerné est trop incertain pour une estimation quantitative.
- les impacts radiologiques et chimiques sur la population et les travailleurs sont analysés à partir de données officielles qui sont complétées par des éléments qualitatifs issus de la littérature et d'entretiens avec les parties prenantes.
- les externalités économiques sont estimées quantitativement à partir de données et d'hypothèses posées et explicitées dans la section dédiée ci-dessous.

A la différence des précédents critères, l'analyse des critères territoriaux et sociétaux est présentée par indicateur.

5.3.1. - Impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires

Ce critère social est mesuré par plusieurs indicateurs : trafic routier, bruit, luminosité nocturne, influence sur la qualité du paysage, craintes sur la présence d'installations nucléaires, image du territoire. Les données et éléments qualitatifs sur le sujet sont dans un premier temps exposés. Les résultats des entretiens avec les acteurs locaux sont ensuite présentés avec les scores associés au cycle URT+Pu pour les territoires de La Hague et autour de Marcoule.

Le cycle URT+Pu est caractérisé, entre autres, par l'existence des usines d'Orano à La Hague et Marcoule jusqu'à *a minima* 2100. Le cycle ouvert suppose au contraire un arrêt des activités de ces usines à horizon 2040 et la création d'un centre d'entreposage en piscine sur un territoire au milieu de la France.

Analyse des données existantes

5.3.1.1. Niveau de trafic routier

D'après les rapports d'information récents d'Orano sur le site à La Hague, 1193 transports externes de matières radioactives ont été réalisés en 2022 pour l'usine à La Hague, dont :

- 525 réceptions de colis (UNE, MOX France, MOX Japon, déchets, linge, emballages vides, etc.)
- 668 expéditions (poudre de plutonium à destination de Melox, Nitrate d'Uranyle, déchets, linge, emballages vides, etc.)

A cela vient s'ajouter 1230 réceptions de transport dangereux mais non radioactif : produits chimiques, pétroliers, gaz. 125 expéditions de matériels non radioactifs ont par ailleurs été réalisés (transformateurs, batteries, déchets contenant de l'amiante, déchets médicaux, eaux avec traces d'hydrocarbures). Il y a également eu 8457 transports internes réalisés mais qui n'influent pas sur le trafic routier des riverains car restant au sein du site d'Orano.

Le transport de matières et de matériels sur la voie publique s'élève ainsi à environ 2548 transports en 2022.

Afin de comptabiliser exhaustivement le trafic routier engendré par l'activité de l'usine, il convient de prendre en compte les trajets des employés d'Orano et des prestataires. Des données sur ce nombre n'ont pu être mobilisées mais le nombre d'employés fournit un ordre de grandeur des trajets quotidiens : le site d'Orano La Hague comptabilise à ce jour 4000 employés et 1000 prestataires susceptibles de se rendre sur le site chaque jour.

En ce qui concerne Melox, 407 transports ont été réceptionnés ou expédiés par l'usine Melox en 2022 (rapport d'information d'Orano Melox, 2022). 43% des flux (sur les 407 transports) représentent des transports de matières radioactives par voie publique. Ils comprennent :

- La réception et expédition de poudre d'UO₂ (utilisée pour faire du MOX)
- La réception de poudre de PUO₂ (utilisée pour faire du MOX et expédiée depuis l'usine de La Hague)
- L'expédition d'assemblages de MOX
- L'expéditions de rebuts de MOX (vers les usines de La Hague)
- Les réceptions et expéditions de sources, d'échantillons et d'emballages vides

Certains transports sont déjà comptabilisés dans les transports issus de l'usine à La Hague (poudre de plutonium, rebuts de MOX) mais impactent les deux territoires.

En matière de transport lié aux trajets des employés, l'usine d'Orano Melox comprend à ce jour 1450 employés et prestataires.

Les données en matière d'évolution du nombre de transport de matières et d'employés au cours du siècle, et notamment à la suite du renouvellement des installations de l'aval, sont indisponibles. Il convient notamment de considérer le trafic routier en phase de chantier qui pourrait être important lors de ces renouvellements.

En cycle ouvert, aucune différence ne serait ressentie par les riverains avant 2040. Au-delà, il est nécessaire de construire près de 20 piscines d'entreposage d'une capacité individuelle de 5000 tMLi (tonnes de métal lourd correspondant à la masse d'uranium ou bien de plutonium pour les combustibles MOX). Ces chantiers entraîneraient également un impact sur le trafic routier pour le territoire concerné.

S'agissant du trafic routier généré par le transport de combustibles, EDF estime qu'un tel centre pourrait impliquer 200 entrées et sorties chaque année dans la phase de remplissage de la piscine (entrée d'emballages pleins de combustibles et sortie d'emballages vides) et 50 entrées et sorties chaque année dans la phase de fin d'exploitation (entrée d'emballages vides et sortie d'emballages pleins de combustibles). Entre les deux phases, il n'y aurait pas de transport. En termes de trafic lié aux trajets des employés, le nombre d'emplois est estimé dans l'analyse du critère d'externalité économique à environ 790 emplois directs et indirects à terme.

Ces données sont complétées par un éclairage de deux acteurs locaux qui se prononcent sur un score d'impact du trafic routier actuel sur le bien-être de la population locale autour d'Orano La Hague et Melox (voir ci-après). Un tel score ne peut être calculé pour le cycle ouvert compte tenu des incertitudes sur le territoire potentiel.

5.3.1.2. Niveau de bruit

D'après les derniers rapports d'information d'Orano sur le site à La Hague (2021 et 2022), la réglementation impose qu'en limite de propriété, les seuils suivants ne soient pas dépassés : 70 dB le jour et 60 dB la nuit. En 2014, une campagne de mesure a été effectuée révélant que les valeurs du bruit respectent les seuils fixés par la réglementation, de jour comme de nuit. Une nouvelle expertise sera menée en 2024.

D'après les derniers rapports d'information d'Orano Melox (2021 et 2022), des mesures sur le bruit émis par l'usine de Melox sont régulièrement réalisées par un organisme agréé. Les derniers résultats montrent qu'au maximum, en bordure du site, le bruit émis est de l'ordre de 60.5 dB, sans impact sur les riverains.

Tout comme pour le trafic routier, les phases de reconstruction des usines à La Hague et de Melox pourraient générer d'importantes nuisances sonores. Cela vaut également pour la construction du site d'entreposage centralisé des combustibles usés en cycle ouvert. Les nuisances sonores du chantier constituent l'une des craintes de la population vis-à-vis du projet de construction de piscine porté par EDF à La Hague.

En fonctionnement, un centre d'entreposage de combustibles usés peut générer du bruit créé par les systèmes de refroidissement mais cela dépend de la conception du centre. En Suède, le CLAB²⁶ (centre d'entreposage en piscine du combustible usé) est par exemple conçu en partie en sous-sol, limitant le bruit à 40 dB, sans impact pour les riverains²⁷.

5.3.1.3. Niveau de luminosité nocturne

La luminosité nocturne émise par les usines fait partie intégrante des potentielles nuisances des activités du cycle contrôlées. Cependant, aucune étude sur le sujet n'a pu être identifiée.

Les entretiens n'ont par ailleurs pas montré que ce sujet constituait un enjeu pour les riverains et le territoire.

5.3.1.4. Niveau d'influence sur la qualité du paysage

Aucune information n'a pu être collectée sur l'influence des usines d'Orano La Hague et Melox sur le paysage et le ressenti associé pour les riverains du territoire.

En cycle ouvert, la construction significative de piscines d'entreposage de combustibles usés poserait un enjeu d'acceptabilité fort, notamment en raison du sujet de l'artificialisation des sols que de tels projets soulèvent. Le sujet de la préservation du paysage est par ailleurs abordé dans la concertation publique portant sur le projet EDF de piscine d'entreposage centralisé de ses combustibles usés sur le site de La Hague.

Une analyse de visibilité a été réalisée en Suède afin d'évaluer l'impact paysager du CLAB. L'étude montre que la présence de végétation à proximité du site est une des solutions qui joue un rôle important pour masquer le site et maintenir un paysage agréable pour les riverains du territoire²⁸.

²⁶ Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel.

²⁷ Environmental impact statement of Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel in Sweden (2011).

²⁸ Environmental impact statement of Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel in Sweden (2011).

5.3.1.5. Craintes de la population sur la présence d'installations nucléaires

Des études d'opinion sur la perception des sites Orano La Hague et Melox ont été réalisées sur des échantillons représentatifs des populations locales autour de ces sites²⁹. Bien que ces enquêtes ne portent pas spécifiquement sur les craintes de la population, certaines questions permettent de donner des indices en ce sens.

A La Hague, 74% des répondants indiquent une réponse positive ("oui plutôt" ou "oui tout à fait") à la question si Orano La Hague est un site respectueux de la santé des habitants contre seulement 17% qui répondent "non plutôt pas" ou "non pas du tout". 78% répondent positivement à la question si Orano La Hague est sûr contre 12% qui répondent négativement. Respectivement 9% et 10% ne se prononcent pas sur ces questions.

Une majorité des répondants (82%) ont par ailleurs confiance ("plutôt confiance" ou "tout à fait confiance") en Orano pour bien gérer le site contre 15% qui n'ont pas confiance et 3% qui ne se prononcent pas. Enfin, 85% ont confiance en Orano pour gérer efficacement et dans le respect des normes de sécurité les combustibles usés, contre 13% qui n'ont pas confiance et 2% ne se prononcent pas.

Autour du site d'Orano Melox, 60% des répondants pensent qu'Orano Melox est respectueux de la santé des habitants contre 21% qui pensent le contraire (19% qui ne se prononcent pas). 59% pensent que le site Melox est sûr tandis que 19% répondent non à la question (22% ne se prononcent pas). Enfin, 74% accordent leur confiance en Orano pour bien gérer le site Melox contre 19% qui ne l'accordent pas (7% ne se prononcent pas) et 77% ont confiance en Orano pour gérer efficacement et dans le respect des normes de sécurité la fabrication de combustibles recyclés contre 17% qui n'ont pas confiance (6% ne se prononcent pas).

Ces études soulèvent quelques craintes parmi les populations locales qui sont par ailleurs plus élevées en proportion autour de Melox qu'autour du site d'Orano à La Hague. Cela représente toutefois une minorité de la population des territoires qui accordent globalement sa confiance à Orano, ce qui peut notamment s'expliquer par le fait qu'une partie de celle-ci est employée directement ou indirectement par les sites. De plus, ces résultats ne permettent pas d'identifier les raisons sous-jacentes des individus répondant non à ces questions. Ces réponses pourraient en effet soulever de véritables craintes vis-à-vis de la présence d'installations nucléaires à proximité mais pourraient également s'expliquer par les opinions des individus vis-à-vis de l'industrie nucléaire en général. Par ailleurs, les inquiétudes peuvent provenir d'un manque d'information sur les activités réalisées sur ces sites. L'enquête révèle par exemple que 66% des répondants s'estiment mal informés sur les activités de Melox et seulement 2% citent la CLI comme source d'information utilisée. A La Hague, 41% des répondants pensent que l'activité du site consiste à stocker des déchets nucléaires.

Aucune information n'a pu être recueillie sur les craintes potentielles d'une population vivant autour d'un site d'entreposage centralisé de combustibles usés (cycle ouvert). Cependant, dans la mesure où ce site serait situé, par hypothèse, sur un territoire au milieu de la France, il est probable que cela soulèverait un enjeu d'acceptabilité fort, notamment expliqué par les craintes vis-à-vis d'une installation nucléaire si la population locale n'est pas habituée à la présence de cette industrie sur son territoire.

5.3.1.6. Impact sur l'image du territoire

L'impact des activités des cycles sur l'image du territoire peut se lire dans les deux sens avec un effet qui peut être positif ou bien négatif.

L'enquête réalisée par VBA³⁰ fournit également des indications sur cet aspect en demandant à la population si Orano fait connaître le territoire et contribue à son rayonnement. Elle révèle ainsi que 64% et 54 % des répondants pensent effectivement que les usines d'Orano La Hague et Melox font connaître leur territoire et contribuent à leur rayonnement. 27% (Orano La Hague) et 28% (Melox) répondent non à la question et 9% et 18% ne se prononcent pas.

²⁹ Enquêtes BVA – « étude locale sur la perception du site Orano La Hague » et « étude locale sur la perception du site Orano Melox » (2023).

³⁰ Enquêtes BVA – « étude locale sur la perception du site Orano La Hague » et « étude locale sur la perception du site Orano Melox » (2023).

Une grande majorité des répondants reconnaissent par ailleurs qu'Orano contribue au dynamisme économique de la région (87% à La Hague et 77% à Melox).

En cycle ouvert, il est complexe d'identifier l'impact qu'aurait un centre d'entreposage de combustibles usés sur l'image du territoire concerné. Le projet de piscine d'EDF à La Hague montre des inquiétudes de la part des élus et riverains sur l'impact que cela pourrait produire sur l'image du territoire. Ces craintes ont notamment été soulevées lors de la concertation³¹ engagée sur le projet. Le nombre de piscines en cycle ouvert serait bien plus important et l'ensemble des combustibles entreposés serait voué au stockage, ce qui pourrait dégrader l'image du territoire sur lequel le centre est implanté. Cela reste néanmoins incertain et dépend du contexte géographique, économique et social du territoire.

Résultats des entretiens

Deux entretiens ont été menés avec des acteurs territoriaux dans l'objectif d'attribuer des valeurs quantitatives aux impacts sociaux sur les riverains et les territoires. Pour cela, des scores de performance ont été proposés par les répondants sur les différents indicateurs, accompagnés de leurs arguments. Cette analyse vise à apporter des éclaircissements concrets sur les impacts des activités de traitement-recyclage sur le territoire (à La Hague et Marcoule), au-delà des aspects économiques. Les résultats exposés ci-dessous doivent cependant être regardés avec prudence puisque seulement 2 acteurs ont pu être interrogés et les réponses apportées reposent sur des témoignages de la situation actuelle. Il était en effet complexe d'établir des projections à long terme (au-delà de 2040) sur ces sujets du quotidien. Par ailleurs, aucun score n'a été déterminé sur les impacts en cycle ouvert dans la mesure où il n'était pas possible d'interroger des acteurs d'un territoire non-identifié.

Les deux parties prenantes interrogées sur ces sujets, l'une du territoire autour d'Orano La Hague et l'autre du territoire autour d'Orano Melox, sont anonymes car seules leurs réponses sont présentées ci-dessous. Afin de compléter cette analyse, il aurait été intéressant d'interroger davantage d'acteurs territoriaux à différents niveaux (élus locaux, départementaux et régionaux). De tels entretiens n'ont pu être menés faute de temps mais devraient être envisagés lors de prochaines études.

Le tableau ci-dessous présente les scores de performance proposés par les acteurs territoriaux pour chaque indicateur.

Indicateurs	Acteur du territoire autour d'Orano La Hague	Acteur du territoire autour d'Orano Melox
Nuisances du trafic routier	3	5
Nuisances du bruit	2	0
Nuisances de la luminosité	2	0
Impact sur la qualité du paysage	4	1-2
Craintes du nucléaire	3	0
Impact sur l'image du territoire	3-4 L'entretien révèle qu'il s'agit d'un impact négatif	4-5 L'entretien révèle qu'il s'agit d'un impact positif

Tableau 9 : scores issus des entretiens avec des acteurs territoriaux selon la situation actuelle

³¹ Bilan CNDP de la concertation du 8 août 2022.

Pour rappel l'échelle de réponses utilisée est la suivante : nul (0), très faible (1), faible (2), modéré (3), fort (4), très fort (5) et extrême (6). Les réponses nuancées sont acceptées ce qui signifie qu'une réponse "modéré à fort" est retenue et comptabilisée "3-4".

Les deux entretiens semblent montrer que les externalités sociales négatives sur les riverains et le territoire sont plus marquées autour du site d'Orano La Hague. Les principaux impacts sociaux autour d'Orano La Hague sont l'impact sur le paysage et sur l'image du territoire. Autour de Melox, l'enjeu essentiel est celui du trafic routier. La présence d'Orano a également un impact sur l'image du territoire mais celui-ci est considéré comme positif. Les nuisances liées au bruit et à la luminosité n'apparaissent pas comme des problématiques remontées par la population. Ces sujets pourraient cependant être approfondis avec des entretiens supplémentaires.

Le trafic routier s'explique par les flux de personnes travaillant à Orano. Ces flux sont réalisés sur un unique axe principal à La Hague (D22), ce qui peut avoir un impact pour les riverains qui la fréquentent. Il a été avancé que ces derniers y sont cependant habitués et s'y adaptent. Autour de Marcoule, le trafic routier est un vrai sujet dont les élus entendent parler. Le flux de personnes venant travailler à Marcoule (Orano, CEA, Cisbio Biossay...) est important mais il est difficile d'identifier l'impact isolé de Melox. Au niveau du site de Marcoule, 7000 à 8000 passages quotidiens sont recensés en comptabilisant Melox. Ces flux conséquents créent des problématiques de congestion sur certains axes et des risques d'accidentologie sur d'autres.

A La Hague, l'entretien souligne les apports économiques considérables d'Orano pour le territoire mais reconnaît qu'une implantation industrielle a indéniablement un impact fort sur le paysage. Par ailleurs, Orano est aujourd'hui bien intégré au territoire avec une acceptation forte de la population locale, mais l'entretien évoque un impact négatif modéré à fort sur l'image du territoire et le tourisme. Il a été constaté que certains touristes ont regretté la présence de cette installation sur le territoire lors de leur visite et que des individus ne se rendent pas à La Hague pour cette raison (personnes anti-nucléaires notamment). L'impact pourrait davantage s'accroître si le volume d'activité venait à augmenter dans le futur.

Sur le territoire autour de Marcoule, Melox est vu comme un fleuron qui a un impact très positif sur l'attractivité des entreprises et des habitants. L'industrie permet d'apporter beaucoup d'emplois bien rémunérés et se situe dans un territoire dans lequel le niveau d'acceptation du nucléaire est élevé. Selon l'acteur territorial, il n'y a pas eu de retours négatifs sur Marcoule de la part de la population et la présence de Melox ou des installations nucléaires en général n'a pas d'incidence sur le tourisme. Il est cependant difficile d'isoler l'effet de Melox qui est situé au sein du site de Marcoule. En l'absence d'Orano Melox, les impacts des autres industries de Marcoule et du centre de recherche du CEA sur le territoire seraient tout de même présents.

L'entretien avec l'acteur du territoire autour d'Orano La Hague a également permis de cerner les enjeux territoriaux d'une construction de piscine d'entreposage (scénario en cycle ouvert) avec le projet d'EDF, bien que ces enjeux soient spécifiques aux caractéristiques du territoire (la présence d'installations nucléaires depuis des décennies a notamment une influence). En particulier, trois enjeux territoriaux découlant de la construction d'une piscine ont été évoqués : les nuisances du chantier qui peuvent s'étaler sur une période importante, l'impact sur l'image du territoire d'une activité d'entreposage qui n'est pas une activité de production et génère peu d'emplois (impact encore plus important sans retraitement puisque cette piscine serait alors remplie de déchets) et l'emprise sur le foncier du territoire³².

Les scores communiqués au cours des entretiens ont été recodés afin d'obtenir une interprétation des indicateurs comparables entre les deux acteurs territoriaux et avec les scores des critères sociétaux. Cette conversion est en particulier nécessaire pour comparer les scores de l'indicateur "impact sur l'image du territoire" considéré comme négatif par l'acteur du territoire autour d'Orano La Hague et positif par l'acteur du territoire autour d'Orano Melox. Les nouveaux résultats qu'il convient de retenir sont exposés dans le tableau suivant :

³² Ce dernier sujet valait pour un nouveau territoire potentiel en cycle ouvert et non pas pour le projet d'EDF qui est prévu sur le foncier d'Orano.

Indicateurs	Acteur du territoire autour d'Orano La Hague	Acteur du territoire autour d'Orano Melox
Nuisances du trafic routier	3 (Modéré)	1 (Très fort)
Nuisances bruit	4 (Faible)	6 (Nul)
Nuisances luminosité	4 (Faible)	6 (Nul)
Impact sur la qualité du paysage	2 (Fort)	4,5 (Très faible-faible)
Craintes du nucléaire	3 (Modéré)	6 (Nul)
Impact sur l'image du territoire	2,5 (Modéré-fort)	4,5 (Fort-très fort)
Moyenne des indicateurs	3,08/6	4,70/6

Tableau 10 : score recodé des entretiens concernant les impacts sur les riverains en cycle URT+Pu

L'interprétation est inversée par rapport au tableau précédent : un score plus élevé signifie que la situation actuelle est considérée comme performante sur ce critère. De ce fait, le score associé aux nuisances du bruit et de luminosité qui est élevé signifie que le cycle actuel performe bien sur ces indicateurs. Le score de l'impact sur l'image du territoire est faible selon l'acteur du territoire autour d'Orano La Hague car cet indicateur ne contribue pas à la bonne performance du cycle sur ce critère (impact négatif). Le score est en revanche élevé autour de Melox qui a un impact positif sur l'image du territoire sur lequel est déjà implanté le site de Marcoule.

Bien que contre-intuitif, ce format permettra de comparer le score de ce critère avec les scores des critères sociétaux dont les sens d'interprétation peuvent varier.

Il est ainsi possible de conclure que sur la base de ces deux entretiens, les impacts négatifs sur le quotidien des riverains et du territoire sont plus faibles autour de Melox qu'autour d'Orano La Hague. En agréant les deux scores individuels des territoires, un score global de 3.89/6 est retenu (entre modéré et faible). Ces impacts sont limités sur les deux territoires mais soulèvent toutefois des problématiques locales intéressantes. Tel que mentionné ci-avant, ces résultats sont exposés pour apporter une valeur quantitative à ces indicateurs mais doivent être nuancés par les limites auxquelles l'analyse est confrontée.

5.3.2. - Impacts radiologiques et chimiques sur la population

Le second critère territorial vise à déterminer le scénario entraînant le moins d'impacts radiologiques et chimiques sur la population. S'agissant du premier type d'impact, deux voies d'exposition aux rayonnements ionisants sont possibles : on parle d'irradiation ou d'exposition externe lorsqu'une personne se retrouve exposée de l'extérieur par de tels rayonnements et d'exposition interne en cas d'incorporation soit par inhalation ou ingestion. Ces impacts sont estimés à partir des rejets liquides ou gazeux autorisés des installations. Les niveaux de dose radioactive auxquelles les humains sont exposés sont estimés en millisievert par an (mSv/an).

Le critère "impacts radiologiques et chimiques" comprend trois indicateurs : l'impact radiologique sur la population locale, l'impact radiologique sur les travailleurs d'Orano et ses sous-traitants et l'impact chimique sur la population locale et les travailleurs.

Ce critère est analysé à partir des données publiées sur le sujet et est complété par des discussions qualitatives apportées lors des entretiens avec les parties prenantes. Aucun score n'est cependant établi sur ce critère déterminé par fonction de valeur. Les résultats de l'ACV ne sont pas utilisés car les indicateurs associés à la santé sont calculés au niveau global. Le critère étudié ici s'intéresse aux impacts des activités de l'aval du cycle sur les populations locales.

5.3.2.1. Impact radiologique sur la population locale

Le rapport annuel de surveillance de l'environnement d'Orano La Hague de 2022 étudie les doses reçues par des groupes de population de référence qui correspondent aux groupes susceptibles d'être les plus exposés autour de l'usine d'Orano La Hague. Les résultats sont communiqués dans le tableau ci-dessous :

Population de référence	Type de rejet	Dose annuelle (mSv/an)
Agriculteurs de Digulleville	Liquide	0,0004
	Gazeux	0,0095
	Total	0,0099
Pêcheurs de Goury	Liquide	0,0023
	Gazeux	0,0023
	Total	0,0047
Agriculteurs de Herqueville	Liquide	0,0004
	Gazeux	0,0045
	Total	0,0049

Tableau 11 : impact annuel 2022 des rejets liquides et gazeux pour chaque population de référence, source : rapport de surveillance de l'environnement (Orano, 2022)

L'impact des rejets de l'établissement en 2022 est de moins de 0,02 mSv/an sur les groupes de population susceptibles d'être les plus exposés. Cette dose correspond à moins de 1 % de l'exposition due à la radioactivité naturelle. Pour rappel, la réglementation française limite à 1 mSv/an pour le public la dose ajoutée du fait des activités nucléaires.

S'agissant de l'usine de Melox, la population de référence correspond aux habitants du village de Codolet, à proximité directe du site. L'impact des rejets atmosphériques de Melox mesuré en 2022 était de 0,0000001 mSv par an (rapport d'information d'Orano Melox, 2022). L'impact dosimétrique, en y ajoutant l'impact de l'ensemble du site de Marcoule, se situe bien en-deçà de la valeur limite pour le public, fixée à 1 mSv/an.

Bien que le contexte soit différent, le retour d'expérience de l'activité du CLAB en Suède permet de fournir un ordre de grandeur de l'exposition radiologique d'un centre d'entreposage en piscine sur la population pour estimer l'impact potentiel en cycle ouvert. Le groupe critique (population de référence) considéré dans l'étude environnementale de 2011 de l'activité du CLAB³³ est le groupe d'âge des 7-12 ans qui correspond au groupe qui reçoit la dose la plus élevée. Il a été constaté que la dose reçue par le groupe critique au cours de la période 1998-2009 varie entre moins de 0,000001 et 0,000003 mSv/an. L'activité de l'eau est mesurée avant qu'elle ne soit mélangée à l'eau de refroidissement de l'installation et acheminée vers le canal d'évacuation de l'eau de refroidissement. Les rejets d'activité du CLAB par l'eau sont très faibles. Les rejets annuels par l'eau et la dose qui en résulte pour le groupe critique (groupe d'âge 7-12 ans) montrent que les doses réelles ont diminué avec le temps et sont, entre 2005 et 2009, bien inférieures aux calculs d'autorisation de 5×10^{-5} mSv/an.

Les doses d'exposition radiologique sur les populations de référence sont ainsi bien en-deçà des valeurs réglementaires et considérées comme sans impact sur la santé de la population. Bien que ces niveaux seraient encore moins élevés en cycle ouvert, l'indicateur n'est pas discriminant entre les deux cycles.

5.3.2.2. Impact radiologique sur les travailleurs

La dosimétrie de ces individus est soumise à une réglementation différente de celle du reste de la population mais reste strictement contrôlée. La valeur limite d'exposition du corps entier aux rayonnements ionisants est de 20 mSv par individu sur 12 mois consécutifs.

Le tableau ci-dessous résume les doses mesurées en 2022 pour les usines de La Hague et de Melox :

³³ Environmental impact statement of Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel in Sweden (2011).

Année	Dose annuelle (mSv/homme)			
	Orano La Hague		Orano Melox	
	Personnel Orano	Entreprises extérieures	Dose individuelle moyenne	Dose individuelle maximale
2019	0,131	0,214	1,94	11,575
2020	0,140	0,199	2,1	11,692
2021	0,144	0,181	1,93	11,25
2022	0,139	0,157	2,15	10,597

Tableau 12 : dosimétrie des travailleurs (salariés Orano et prestataires) de 2019 à 2022, source : rapports d'information Orano La Hague et Melox (2020, 2021, 2022).

Les doses d'exposition sont plus importantes à Melox qu'à La Hague mais restent en deçà de la limite fixée à 20 mSv sur 12 mois glissants, y compris pour les doses individuelles maximales.

Les données du CLAB en Suède donnent des indications sur les niveaux dosimétriques des travailleurs dans un centre d'entreposage seul. L'étude d'impact environnementale précédemment mentionnée montre qu'au cours de la période 1985-2009, la dose totale reçue par les travailleurs a varié entre 0,3 et 2,25 mSv/homme/an. Cependant, les données étant estimées sur une période datant de plus de 14 ans, il est probable qu'un centre d'entreposage dans un cycle ouvert en France ouvrant en 2040 impliquerait des améliorations et une réduction des doses. Par ailleurs, les données actuelles à La Hague, qui comportent une partie dédiée à l'entreposage, font part de doses inférieures.

Au regard des faibles valeurs de doses d'exposition des travailleurs par rapport à la réglementation, l'indicateur d'impact radiologique sur les travailleurs n'est pas discriminant entre les cycles.

5.3.2.3. Impact chimique sur la population locale et sur les travailleurs

L'impact chimique des rejets sur la population locale et les travailleurs est plus complexe à mesurer que l'impact radiologique dans la mesure où il n'est pas possible d'agréger l'impact de toutes les substances chimiques dans un seul indicateur, certaines ayant des effets stochastiques, d'autres des effets déterministes. Cet impact s'exprime alors respectivement en termes d'excès de risque individuel (ERI) pour les effets stochastiques et de quotient de danger (QD) pour les effets déterministes. Les évaluations de risques sanitaires associées montrent que la somme des ERI est très inférieur à 10^{-5} , considéré comme un risque acceptable dans les études INERIS et INVS et que chaque QD est très inférieur à 1. Ces évaluations sont réalisées à partir de scénarios équivalents à la notion de groupe de référence ou personnes représentatives utilisés pour les études d'impact dosimétriques sur les populations riveraines. Ces études, validées par l'INERIS, concluent que l'existence de risques chroniques préoccupants pour la santé des populations, liés aux rejets chimiques du site, peut être écartée.

Les travaux du GRNC (groupe radio-écologique Nord-Cotentin) réalisés à la fin des années 1990 ont réuni près de 50 experts français et étrangers et permettent aujourd'hui d'affirmer que le risque de leucémie attribuable aux rejets radioactifs d'Orano est très faible, de l'ordre de 0,002 cas pour la période 1978-1996³⁴. Ces travaux ont été poursuivis jusqu'au début des années 2000 et complétés afin d'évaluer l'impact des rejets chimiques sur la période passée (analyse rétrospective)³⁵. A la suite de ces recherches, le GRNC a conclu à l'absence d'impact de ces rejets. Une approche prospective a également été menée et montre que les risques non cancérigènes découlant des rejets chimiques sont considérés comme non préoccupants. En ce qui concerne les risques cancérigènes, les excès de risque individuel sont inférieurs aux valeurs repères de 0,000001 et 0,00001 considérées comme acceptables par les organismes internationaux. Les incertitudes associées aux calculs pour les 29 substances sont probablement importantes au vu de

³⁴ Conclusions présentées dans le rapport annuel de surveillance de l'environnement d'Orano La Hague (2022).

³⁵ GRNC. Evaluation des risques pour la santé humaine associés aux rejets chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin (2002).

la liste des hypothèses et des simplifications inventoriées. Elles ne remettent toutefois pas en cause l'ordre de grandeur des résultats pour la plupart de ces substances en raison de la faiblesse des risques obtenus et du caractère majorant des hypothèses considérées dans ces études.

Aucune étude d'impact chimique sur la population locale et les travailleurs n'a été identifiée pour une activité d'entreposage seule similaire à celle supposée dans le scénario cycle ouvert. Néanmoins, les rejets chimiques d'une activité d'entreposage sont bien plus faibles que ceux d'une activité de traitement-recyclage.

A l'instar des impacts radiologiques sur la population locale et les travailleurs, les impacts chimiques ne constituent pas un enjeu discriminant entre les deux scénarios tant les risques d'un impact sanitaire sont faibles quel que soit le cycle.

Résultats des entretiens

Les entretiens réalisés avec diverses parties prenantes (Orano, IRSN, Sauvons le climat, Negawatt, Greenpeace, Global Chance, SFEN) montrent un consensus sur l'absence d'impacts radiologiques et chimiques sur la population qui ne sont pas des critères discriminants entre les deux cycles. Les niveaux de doses sont très bas et en dessous de la dose réglementaire qui assure qu'il n'y ait pas d'impact sur la santé. Par ailleurs, les travaux du GRNC ont montré l'absence d'un lien causal entre les rejets radiologiques et chimiques et la santé de la population.

Bien que la tendance ressortie en entretien confirme les informations présentées ci-dessus, des éléments de nuance ont été avancés par certaines parties prenantes :

- L'impact radiologique sur les travailleurs n'est pas si évident et des études sur le sujet devraient être menées, particulièrement à Melox où le niveau de dose est plus important.
- Le débat est plus complexe en regardant le détail des doses qu'en se concentrant sur la dose moyenne à laquelle les populations de référence sont exposées. Les effets du tritium font par exemple l'objet de désaccords importants dans la communauté scientifique.
- Les impacts, bien qu'actuellement faibles, le seraient encore plus en cycle ouvert, en particulier avec un entreposage à sec.
- Au-delà des données scientifiques qui sont publiées dans les rapports d'Orano, plusieurs parties prenantes rappellent qu'il y a aussi un sujet d'acceptabilité par le grand public à ce qu'il y ait des rejets radioactifs.
- Les opposants au traitement-recyclage affirment que la différence avec un cycle ouvert ne repose pas sur les impacts lors du bon fonctionnement des usines mais plutôt sur les impacts en cas de problème, avec un risque plus important d'une exposition radioactive catastrophique en cas d'accident en cycle URT+Pu. Tel qu'exposé dans la section 3.2.2. -, le sujet de risque d'accident n'est toutefois pas étudié dans cette analyse.

5.3.3. - Externalités économiques

Le troisième critère porte sur les retombées économiques des activités du cycle du combustible. Comme pour les autres critères territoriaux, l'analyse consiste à comparer les effets des activités d'Orano à La Hague et de Melox aux effets potentiels d'un centre d'entreposage en piscine sur un territoire non-identifié au milieu de la France. Trois indicateurs permettent de mesurer les effets économiques des cycles : le nombre d'emplois engendrés par les activités, la valeur ajoutée générée et les retombées fiscales pour l'Etat et les territoires.

Ces indicateurs sont estimés quantitativement à partir de données fournies par les exploitants Orano et EDF et d'hypothèses explicitées ci-après. Les analyses sont complétées par des éléments de contexte sur les territoires et le poids d'Orano pour ceux-ci. Ces éléments proviennent des entretiens menés avec trois acteurs locaux.

A noter que les externalités économiques liées à l'activité d'entreposage dans les deux cycles se basent sur une estimation par EDF et Orano du nombre de piscines construites dans chaque scénario. En cycle URT+Pu, ce nombre s'élève à 5,3 piscines de 5000 tML chacune (soit 26631 tML). En cycle ouvert, ce nombre est de l'ordre de 19,1 piscines

(soit 95740 tML). Les données relatives au scénario de cycle URT+Pu avec le prochain parc d'EPR2 seront communiquées lors de la publication de la nouvelle ACV prospective du CEA (en cours).

5.3.3.1. Nombre d'emplois directs, indirects et induits

Les emplois générés par les activités d'Orano à La Hague et Melox peuvent être découpés en trois catégories :

- les emplois directs : correspondent à l'ensemble des salariés d'Orano à La Hague et Melox
- les emplois indirects : représentent les salariés des prestataires et fournisseurs des usines d'Orano à La Hague et Melox
- les emplois induits : les employés directs et indirects consomment et créent du chiffre d'affaires dans d'autres secteurs (commerces alimentaires, restaurants, etc.), ce qui permet à ces derniers de recruter

A ce jour, l'usine de La Hague comptabilise 4000 employés directs et contribue à créer des emplois indirects en recourant à 1000 travailleurs prestataires³⁶. Afin d'estimer le nombre d'emplois induits, le coefficient multiplicateur de l'étude économique de PwC sur la filière nucléaire en France³⁷ est repris. Celui-ci repose sur les données INSEE compilées dans les tableaux entrée-sortie de l'économie française et les statistiques du budget des ménages français. Bien que le contexte économique français ait évolué depuis la date de réalisation de l'étude, cette dernière permet de bénéficier d'un ratio appliqué au secteur concerné. Ce coefficient multiplicateur est par conséquent retenu pour l'analyse et s'élève à 1,37 (signifiant la création d'1,37 emplois induits pour 1 emploi direct). Le nombre d'emplois induits par l'activité de La Hague est ainsi estimé à 5480 emplois.

L'usine de Melox compte 850 emplois directs et 600 emplois indirects (prestataires)³⁸. Le nombre d'emplois induits est ainsi estimé à environ 1165 emplois.

Au global, le cycle URT+Pu génère 4850 emplois directs, 1600 emplois indirects et 6645 emplois induits. Il n'a pas été possible de projeter ces données dans le temps, notamment au-delà de l'horizon 2040 à partir duquel les deux scénarios se distinguent. Dans la mesure où Orano prévoit un programme de maintenance puis de renouvellement des installations de traitement-recyclage dans les décennies à venir, le nombre d'emplois augmentera de fait, notamment en phase chantier. A défaut de projections plus étayées, il est supposé que le nombre d'emplois pour le traitement-recyclage reste constant dans le temps. Cependant, l'activité d'entreposage aujourd'hui présente à Orano La Hague augmentera en cycle URT+Pu. Tel que décrit en début de section, EDF et Orano estiment que 5,3 piscines de 5000 tML chacune (soit 26631 tML) devront être construites en cycle URT+Pu pour entreposer les combustibles UNE en attente de traitement et les combustibles MOX et URE usés du parc actuel. Cette hausse d'activité génèrera également des emplois. Ceux-ci sont estimés à environ 255 emplois directs et indirects³⁹, ce qui implique 350 emplois induits supplémentaires.

En supposant un nombre d'emplois constant pour les activités de traitement-recyclage et de fabrication du MOX, sans comptabiliser l'entreposage des combustibles du parc EPR2 et sans tenir compte des phases chantier (impliquant de fait une sous-estimation), le nombre total d'emplois du cycle URT+Pu est donc d'environ 6700 emplois directs et indirects et de près de 7000 emplois induits, soit un total de 13 700 emplois.

En cycle ouvert, l'estimation du nombre d'emplois directs, indirects et induits repose sur les données du projet de piscine d'EDF à La Hague ajustées aux hypothèses du scénario. D'après EDF, le projet de piscine à La Hague pourrait contenir 6500 tML de combustibles usés et générer approximativement 100 emplois directs et indirects (employés EDF et

³⁶ Source : <https://www.orano.group/fr/l-expertise-nucleaire/tour-des-implantations/recyclage-du-combustible-use/la-hague/expertise-unique->

³⁷ PwC. Le poids socio-économique de l'électronucléaire en France (2011).

³⁸ Rapport d'information du site Orano Melox (2022).

³⁹ L'estimation repose sur le nombre d'emplois prévu pour le projet de piscine d'EDF (100 emplois directs et indirects) pour 6500 tML de combustibles entreposés soit une moyenne de 1/65 emploi par tML. Il est cependant supposé que le nombre d'emplois n'est pas proportionnel au tonnage et qu'au-delà de 6500 tML, le ratio d'emplois par tonne supplémentaire n'est plus que de $(1/65)*50\%$ (hypothèse). Le calcul suivant est ainsi effectué pour estimer les emplois de 5,3 piscines : $100 + (26631 \text{ tML} - 6500 \text{ tML}) * (1/65) * 50\% = 255$ emplois.

prestataires) et 150 emplois induits environ dans la région⁴⁰. Il est estimé que le scénario cycle ouvert nécessite la construction de 19,1 piscines pour entreposer tous les combustibles usés UOX du parc actuel, ce qui correspond à 95 740 tML. Le fonctionnement de l'ensemble de ces piscines génèrerait de l'emploi estimé à 787 emplois directs et indirects⁴¹. En appliquant le même ratio emplois induits / (emplois directs + indirects) que pour le projet EDF (soit 1,5), le cycle ouvert conduirait à la création de 1180 emplois induits.

Sans comptabiliser l'entreposage des combustibles du parc EPR2 et sans tenir compte des phases chantier liées au renouvellement des usines de l'aval du cycle de traitement-recyclage (impliquant de fait une sous-estimation), le nombre total d'emplois du cycle ouvert est donc estimé à environ 790 emplois directs et indirects et 1180 emplois induits, soit un total de 1 970 emplois pour le territoire non-identifié au centre de la France.

L'indicateur nombre d'emplois apparaît ainsi comme discriminant entre les deux scénarios, largement en faveur du cycle URT+Pu qui, d'après ces estimations, entraîne près de 12 000 emplois supplémentaires par rapport au cycle ouvert. Cette différence n'apparaîtrait néanmoins pas avant 2040, date à partir de laquelle une transition effective vers un cycle ouvert serait effectuée dans ce scénario.

Déterminer ce qu'il adviendrait pour les employés directs, indirects et induits en l'absence d'Orano La Hague et Melox est complexe. Les entretiens menés avec les acteurs territoriaux mettent cependant en évidence le poids économique considérable d'Orano sur ces deux territoires. La filière nucléaire représente à elle-seule un tiers des emplois du Cotentin, partagés entre trois grandes industries (Orano La Hague, EDF Flamanville et Naval Group) et ses sous-traitants. Les bureaux d'étude sont très développés au niveau local et en grande partie grâce à Orano qui a structuré son tissu⁴². Au-delà des emplois générés, Orano contribue avec EDF et Naval Group à l'équilibre d'un écosystème local très dépendant de ces industries. Un entretien a souligné le fait que ces industries travaillent ensemble et qu'il y en a toujours au moins une des trois qui porte le tissu économique local avec de gros contrats (Orano avec son programme de maintenance, EDF avec son projet d'EPR, Naval Group avec la construction de sous-marins). Si l'on retire une de ces trois industries, l'écosystème peut se retrouver fragilisé car elles permettent le maintien de l'activité et de la compétence des sous-traitants et évitent les périodes creuses. Les 3 industries interagissent par ailleurs entre-elles. Lors de la perte du contrat de sous-marins par Naval Group, Orano et EDF ont permis le maintien de la compétence sur le territoire en mobilisant les ingénieurs vivant sur le territoire.

Le site de Marcoule fait partie des 3 piliers économiques du territoire (avec l'agriculture et le tourisme) et comprend plusieurs industries comme Melox, pour la fabrication du combustible MOX, mais aussi des industries spécialisées dans le démantèlement et la sécurité (Orano démantèlement notamment), le CEA (cycle des matières, traitement-recyclage, gestion des déchets...), ainsi que des industries qui ont leur propre activité comme Cisbio Biossay. Toutes ces activités à Marcoule ne sont pas dépendantes de Melox. Cependant, un entretien révèle que Melox se distingue par sa taille et son type d'activité. Selon l'acteur territorial interrogé, l'usine génère un nombre d'emplois qui est parmi les plus conséquents de Marcoule et est en expansion. Ce dernier précise également que l'usine est une activité de production, à l'opposé par exemple des activités de démantèlement, qui permet de trouver des clients et de se porter vers l'avenir. Melox est vu comme un fleuron technologique et industriel sur le territoire.

Ces éléments de contexte montrent que l'arrêt des activités d'Orano La Hague et Melox entraînerait des conséquences importantes sur l'emploi des territoires.

⁴⁰ Le coefficient multiplicateur est donc sensiblement différent de celui utilisé par PwC. Cependant, les estimations des emplois pour le projet d'EDF sont des approximations qui ont été retenues pour l'analyse, faute de détails supplémentaires d'EDF à ce jour, notamment sur la distinction entre emplois directs et indirects qui permettrait un calcul des emplois induits à partir des emplois directs. Les chiffres précis pourraient faire varier ce coefficient.

⁴¹ La même logique que pour l'entreposage en cycle URT+Pu est appliquée. Il est supposé un nombre de 100 emplois directs et indirects pour 6500 tML et une hausse de $(1/65)*50\%$ emplois par tML supplémentaire. Le calcul suivant est ainsi effectué pour estimer les emplois de 19,1 piscines : $100 + (95740 \text{ tML} - 6500 \text{ tML}) * (1/65) * 50\% = 787$ emplois.

⁴² Source : entretien avec la CCI Ouest Normandie.

5.3.3.2. Valeur ajoutée directe, indirecte et induite

A l'instar des emplois, la valeur ajoutée peut être découpée en trois :

- la valeur ajoutée directe : correspond à la valeur ajoutée découlant de l'activité d'Orano. Elle est calculée sur la base du chiffre d'affaires de l'industrie.
- la valeur ajoutée indirecte : correspond à la valeur ajoutée générée par les activités des prestataires et fournisseurs d'Orano. Elle est calculée sur la base des achats d'Orano qui reflète du chiffre d'affaires pour ces acteurs.
- la valeur ajoutée induite : les employés directs et indirects consomment et créent du chiffre d'affaires dans d'autres secteurs (commerces alimentaires, restaurants, etc.), ce qui permet de générer de la valeur ajoutée dans l'économie.

Valeur ajoutée directe

En cycle URT+Pu, la valeur ajoutée directe est estimée à partir du chiffre d'affaires d'Orano sur l'aval du cycle. Celui-ci s'élevait à environ 1,8 Mds € en 2022⁴³ mais comprend des prestations en lien avec l'aval du cycle du combustible sans pour autant dépendre du choix du cycle. Le reste représente toutes les prestations liées au traitement-recyclage dont une partie pour l'activité d'entreposage des combustibles usés à La Hague.

Il n'a pas été possible de projeter ces données dans le temps, notamment au-delà de l'horizon 2040 à partir duquel les deux scénarios se distinguent. A défaut de projections, il est supposé que le chiffre d'affaires et donc la valeur ajoutée générée par le traitement-recyclage et les prestations ne dépendant pas du choix du cycle reste constante dans le temps, à l'exception du chiffre d'affaires généré par l'activité d'entreposage. Les hypothèses définies dans la présente étude font état d'une augmentation du nombre de piscines en cycle URT+Pu (construction de 5,3 piscines, soit 26631 tML). Cette hausse d'activité génèrera également de la valeur ajoutée. Le chiffre d'affaires propre à l'activité d'entreposage des combustibles usés est retenu et rapporté aux environ 10 000 tML de combustibles entreposés actuellement à La Hague⁴⁴ afin d'estimer un ratio de chiffre d'affaires moyen par tML entreposée. Ce dernier est ensuite multiplié par les 26631 tML prévu à terme dans ce scénario (en supposant une construction des piscines progressive et linéaire sur la période d'étude).

Une fois les montants de chiffre d'affaires estimés, un taux de valeur ajoutée est appliqué à ces derniers. Le taux de valeur ajoutée retenu pour les activités de traitement-recyclage (hors entreposage) est 52% du chiffre d'affaires. Celui-ci correspond au taux indiqué par l'Insee pour le secteur d'activité "enrichissement et retraitement de matières nucléaires" en 2013⁴⁵. Ce taux est relativement élevé en comparaison d'autres secteurs économiques mais s'explique par un fort niveau de qualification de main d'œuvre, en particulier pour les activités de traitement-recyclage. En revanche, l'activité d'entreposage des combustibles usés avant leur stockage définitif entre dans la sous-catégorie "traitement des déchets nucléaires" référencée par l'INSEE (38.22.11). Dans la mesure où le taux de valeur ajoutée de cette dernière n'est pas indiqué, le taux de la catégorie dans laquelle cette activité s'inscrit est retenu (catégorie 38.22Z "traitement et élimination des déchets dangereux"). Ce taux varie d'une année à l'autre mais a tourné en moyenne autour de 42% entre 2012 et 2016⁴⁶. L'activité d'entreposage est essentiellement une activité de maintenance qui ne génère pas de production et ne nécessite pas un niveau de qualification aussi élevé que pour le traitement-recyclage, ce qui explique un taux de valeur ajoutée plus faible que celui retenu sur les activités de traitement-recyclage. Cela permet d'estimer la valeur ajoutée directe totale en cycle URT+Pu qui s'élève à 942 M € par an à terme lorsque les piscines seront construites.

En cycle ouvert, le chiffre d'affaires lié à l'activité de traitement-recyclage (hors entreposage) est retiré des 1,8 Mds € mentionnés ci-dessus. Le chiffre d'affaires des prestations qui ne dépendent pas du choix du cycle reste constant dans le temps par hypothèse. En ce qui concerne l'activité d'entreposage, la part actuelle de celle-ci dans le chiffre d'affaires est

⁴³ Source : rapport annuel d'activité 2022 (Orano).

⁴⁴ Source : <https://www.orano.group/fr/decodage/nouvelle-piscine-d-entreposage-des-combustibles-uses-de-la-hague>

⁴⁵ Absence de données plus récentes. Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010413752#Tableau>

⁴⁶ Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010414293>

retenue et rapportée aux 10 000 tML de combustibles entreposés actuellement à La Hague afin d'estimer un ratio par tML (logique identique à celle appliquée dans le scénario cycle URT+Pu). Ce dernier est ensuite multiplié par les 95740 tML prévu à terme dans ce scénario (soit 19,1 piscines, en supposant une construction des piscines progressive et linéaire sur la période d'étude). Les taux de valeur ajoutée appliqués sont ensuite ceux utilisés ci-dessus, soit 42% pour l'activité d'entreposage et 52% pour les prestations ne dépendant pas du choix du cycle. Lorsque les piscines seront construites à terme, la valeur ajoutée directe en cycle ouvert s'élèvera à 535 M € par an.

Valeur ajoutée indirecte

La valeur ajoutée indirecte en cycle URT+Pu est calculée à partir des achats d'Orano pour ses usines à La Hague et Melox. Les rapports d'information récents d'Orano La Hague indiquent des achats à hauteur de 850 M€ pour le site à La Hague en 2022, dont 629 M€ en Normandie et de 740 M€ en 2021, dont 518 M€ en Normandie, soit une moyenne d'environ 574 M€ effectué dans la région. Les rapports d'information de Melox indiquent des achats de l'ordre de 170 M€ en 2022, dont 107 M€ dans le Gard et les départements limitrophes, et de 147 M€ en 2021, dont environ 96 M€ au niveau local, soit une moyenne de 102 M€ environ dans le Gard et les départements limitrophes. A l'instar du calcul de la valeur ajoutée directe, ces achats sont considérés constants dans le temps, à l'exception des achats liés à l'activité d'entreposage qui va augmenter avec la construction de piscines (5,3 piscines, soit 26631 tML). En retenant uniquement les achats liés à l'entreposage et en divisant par les 10 000 tML actuellement entreposées à La Hague, un ratio moyen est estimé et s'applique sur les 26631 tML qu'il conviendra d'entreposer à terme dans ce scénario. En appliquant les mêmes taux de valeur ajoutée que précédemment⁴⁷, uniquement au niveau territorial, la valeur ajoutée indirecte totale s'élève à près de 350 M€ par an pour les territoires locaux à terme après la construction des piscines.

En cycle ouvert, seule l'activité d'entreposage est maintenue, avec la construction de piscines estimée à 19,1 piscines (95740 tML). En reprenant le montant des achats d'Orano dédiés à son activité d'entreposage à La Hague et le ratio calculé précédemment sur les 10 000 tML, le chiffre d'affaires est estimé sur les 95740 tML à entreposer en cycle ouvert en tenant compte de la construction progressive des piscines (hypothèse de linéarité sur la période d'étude). Cela permet d'estimer la valeur ajoutée indirecte, d'un montant d'environ 13 M € par an à terme.

Valeur ajoutée induite

Enfin, la valeur ajoutée induite est estimée à partir du coefficient multiplicateur de l'étude économique de PwC sur la filière nucléaire en France⁴⁸. Celui-ci s'élève à 1, signifiant que chaque euro de valeur ajoutée directe génère un euro de valeur ajoutée induite. La valeur ajoutée induite en cycle URT+Pu s'élève ainsi à 942 M € par an à terme, contre 535 M € par an en cycle ouvert.

Au global, en supposant une valeur ajoutée générée par les activités de traitement-recyclage constante, le cycle URT+Pu conduira à terme à une valeur ajoutée totale d'environ 2,23 Mds€ par an. Il convient de noter que ce résultat ne capte pas la valeur ajoutée liée au chantier de renouvellement des usines de traitement-recyclage.

Le cycle ouvert conduira à terme à une valeur ajoutée totale d'environ 1,08 Mds€/an.

L'indicateur valeur ajoutée apparaît ainsi comme discriminant entre les deux scénarios, **largement en faveur du cycle URT+Pu qui, d'après ces estimations, entraîne à terme environ 1,15 Mds€/an supplémentaire par rapport au cycle ouvert**. Cette différence n'apparaîtrait néanmoins pas avant 2040, date à partir de laquelle une transition effective vers un cycle ouvert serait effectuée dans ce scénario.

5.3.3.3. Retombées fiscales

Les activités de l'aval du cycle impliquent diverses retombées fiscales pour l'Etat et les territoires locaux : impôts sur les sociétés, taxes locales, TVA sur les achats, cotisations salariales et patronales... A partir des données publiques d'Orano et d'EDF, les retombées fiscales liées aux impôts sur les sociétés et taxes locales sont estimées.

⁴⁷ En considérant que les prestataires travaillent également au sein de la même filière.

⁴⁸ PwC. Le poids socio-économique de l'électronucléaire en France (2011).

En cycle URT+Pu, les retombées proviennent des activités d'Orano à La Hague et Melox. Les rapports d'information d'Orano sur les deux sites indiquent que 60 millions d'euros (respectivement 70 millions d'euros) d'impôts et de taxes ont été versées en 2022 (respectivement 2021) par Orano La Hague et 2,4 millions d'euros (respectivement 4,3 millions d'euros) ont été versées en 2022 (respectivement 2021) par Orano Melox. Les retombées fiscales issues de l'activité de Melox ont récemment diminué en raison d'une forte baisse de la contribution foncière des entreprises. A défaut de projections sur ces retombées, les valeurs moyennes de ces deux années sont retenues puis sont supposées constantes dans le temps. Elles s'élèvent ainsi à près de 70 millions d'euros par an.

Ce résultat est cependant complété par des retombées issues d'une hausse probable du nombre de piscines dans le temps. L'estimation se base sur les retombées fiscales attendues du projet de piscine d'EDF qui s'élèvent à 3 millions d'euros par an pour une piscine d'entreposage de 6500 tML⁴⁹. En basant le calcul sur l'hypothèse de construction de 5,3 piscines en cycle URT+Pu, il est supposé une relation linéaire entre le montant des retombées et le volume de combustible entreposé (hypothèse). L'estimation du projet EDF induit des retombées annuelles de l'ordre de 461,5€ par tML entreposée (3M€ / 6500 tML). Appliqué aux 26631 tML à entreposer en cycle URT+Pu, les retombées fiscales générées par la hausse d'activité de l'entreposage s'élèvent à près de 12,2 millions d'euros par an à terme lorsque les piscines seront construites.

Au global, en considérant des retombées constantes pour l'activité de traitement-recyclage, le cycle URT+Pu permet de générer environ 82,15 millions d'euros par an.

En cycle ouvert, la même logique de calcul est appliquée à partir des données du projet d'EDF. La construction de 19,1 piscines nécessaires pour entreposer 95740 tML de combustibles usés générerait ainsi près de 44,18 millions d'euros par an à terme lorsque l'ensemble des piscines seront construites.

Tout comme l'emploi et la valeur ajoutée, l'indicateur retombées fiscales est discriminant entre les deux scénarios, largement en faveur du cycle URT+Pu qui, d'après ces estimations, entraîne 38 M€/an supplémentaires par rapport au cycle ouvert. Cette différence n'apparaîtrait néanmoins pas avant au moins 2040, date à partir de laquelle une transition effective vers un cycle ouvert serait effectuée dans ce scénario.

A retenir sur la famille des 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.

⁴⁹ Source : dossier CNDP de concertation sur la création de piscine EDF (2022).

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).

5.4. / Famille de critères sociétaux

La famille de critères sociétaux rassemble des critères considérés comme plus subjectifs compte tenu de la difficulté à les mesurer et/ou des forts sujets de dissensus existants entre les parties prenantes. L'analyse multicritère apporte particulièrement une plus-value pour traiter ces enjeux car elle permet de les mesurer au travers de scores et en tenant compte de la diversité d'opinions entre les acteurs. A la différence des précédents critères (à l'exception du critère d'impact sur le quotidien des riverains), ces critères ne sont donc pas mesurés par des scores établis par fonction de valeur mais par des scores établis par entretien. Les parties prenantes interrogées diffèrent selon les sujets traités en fonction de leur niveau d'expertise ou de connaissance (cf. section 3.2.3. -).

Il convient de préciser que les scores proposés par les parties prenantes peuvent être biaisés par la position de ces dernières vis-à-vis des scénarios étudiés. Par conséquent, les résultats sont exposés pour trois catégories de parties prenantes : les parties prenantes défavorables au traitement-recyclage, les parties prenantes favorables et les parties prenantes supposées neutres de par leur activité. Bien que l'échantillon d'interrogés soit relativement faible, l'importante différence de sensibilité des parties prenantes interrogées permet *a priori* de capturer une bonne partie des principaux désaccords pouvant contribuer à alimenter de prochains débats publics. Par ailleurs, un équilibre du nombre d'entretiens entre chaque catégorie de parties prenantes a été visé et il n'est pas certain qu'une augmentation du nombre d'interrogés dans ces différentes catégories changerait significativement les valeurs de scores par groupe. Pour autant, davantage d'entretiens dans le cadre de prochaines études permettraient de conforter la robustesse des résultats, notamment avec un nombre plus important de parties prenantes (Etat, CNE2...).

Ces scores sont ensuite complétés par une synthèse des principaux arguments des parties prenantes justifiant les choix pris au cours des entretiens. Enfin, une revue de la littérature est présentée afin d'étayer les arguments et identifier si celle-ci s'aligne avec les tendances d'opinions capturées lors des entretiens.

4 critères sociétaux sont étudiés dans cette étude :

- Souveraineté énergétique de la France
- Leadership scientifique et industriel de la France
- Intérêt porté aux générations futures
- Risque de prolifération à partir de plutonium

Chacun de ces critères est mesuré au travers d'un ou de plusieurs indicateurs exposés dans la section 4 /. La structure d'analyse est identique pour chacun de ces indicateurs : présentation de la répartition des scores entre les parties prenantes pour chaque cycle sous la forme d'un nuage de points, description des principaux arguments (avec, entre parenthèses, les parties prenantes à l'origine de l'argument) puis exposition des résultats de la littérature existante.

5.4.1. - Souveraineté énergétique de la France

Le critère de souveraineté énergétique de la France est mesuré par deux indicateurs susceptibles de varier entre les deux scénarios : le niveau d'indépendance de la France pour s'approvisionner en combustible nucléaire et le niveau de fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique. Le premier reflète la souveraineté de la France vis-à-vis de l'extérieur pour se procurer des matières permettant la fabrication du combustible (uranium naturel, URT converti...). Le second levier de souveraineté se traduit par la sécurisation de la production électronucléaire domestique en garantissant la continuité des activités du cycle en France. En d'autres termes, des ruptures d'activité dans une ou plusieurs étapes du cycle pourrait mettre en péril la continuité de la production électronucléaire des réacteurs, rendant la France plus dépendante de l'étranger pour s'approvisionner en électricité. Ces risques de rupture, en particulier à l'aval du cycle qui diffère largement entre les deux scénarios, sont étudiés dans le second indicateur.

8 parties prenantes de diverses sensibilités (favorable au traitement-recyclage, défavorable ou neutre) ont été interrogées sur ce critère. Pour chaque indicateur, les scores élicités et une synthèse des arguments recueillis sont présentés pour éclairer le choix des scores des différentes parties prenantes. Pour rappel, l'échelle de score utilisée est l'échelle de Loekart, variant de 0 (nul) à 6 (extrême). L'indicateur "indépendance de la France pour l'approvisionnement en combustible nucléaire" est croissant, ce qui signifie qu'un score de 0 indique que la France est complètement dépendante de l'extérieur. En ce qui concerne l'indicateur "fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique", un score à 0 signifie que le risque de rupture de la chaîne de production électronucléaire est nul (indicateur décroissant).

5.4.1.1. Indépendance de la France pour l'approvisionnement de combustible nucléaire

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

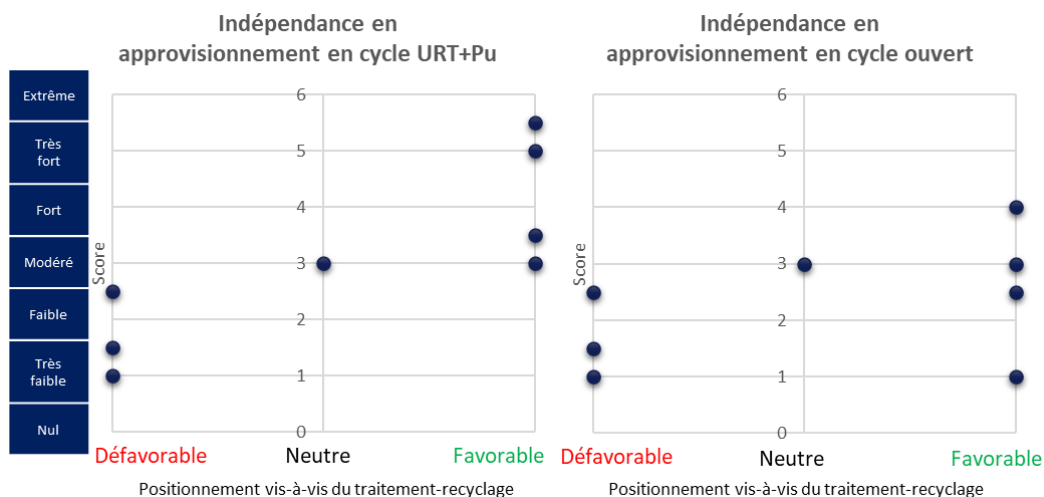


Figure 9 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur d'indépendance pour l'approvisionnement en combustible nucléaire

Les résultats montrent une opposition d'opinions entre les parties prenantes favorables et défavorables. Les premières estiment que le niveau d'indépendance de la France est modéré à très fort en cycle URT+Pu et qu'il se situerait entre très faible et fort en cycle ouvert. Les secondes pensent en revanche que le niveau d'indépendance est faible voire très faible quel que soit le scénario. Les parties prenantes neutres donnent une opinion similaire mais pour un niveau tout de même modéré. Des analyses complémentaires des nuages de points sont présentées en annexe.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur "indépendance de la France pour l'approvisionnement de combustible nucléaire" : 2 tendances d'opinions se dégagent des entretiens

Une différence discriminante en faveur du mono-recyclage :

- Formellement, le traitement-recyclage répond à la loi (code de l'environnement). Il permet notamment d'économiser des ressources (EDF).
- Le mono-recyclage permet entre 20 et 25% d'économie sur l'approvisionnement d'uranium naturel. Fermer encore plus le cycle par le multi-recyclage si possible dans les REP (en cours d'étude) sans attendre les RNR à la fin du siècle, est un enjeu pour renforcer encore le niveau d'indépendance en termes d'approvisionnement en uranium (EDF). Atteindre le MRREP pourrait permettre d'économiser 40% d'uranium naturel (SFEN).
- La différence serait encore plus discriminante si l'objectif de fermeture du cycle avec des RNR était atteint. La France serait alors indépendante vis-à-vis de l'approvisionnement en uranium naturel. (Orano, SFEN, Sauvons le climat, gestionnaire de déchets étranger)
- L'approvisionnement actuel de la France en combustible nucléaire est diversifié tant sur le plan de l'approvisionnement en uranium naturel que de services de conversion, enrichissement et fabrication d'assemblages. Cette diversification sécurise l'approvisionnement en combustible du parc de réacteurs en France en limitant les risques industriels et géopolitiques. (Orano, EDF, SFEN, Sauvons le climat)
- En cas de rupture d'approvisionnement totale que la diversification rend peu probable, la France dispose de stocks de sécurité qui lui permettrait de faire tourner les réacteurs pendant la situation de crise (EDF, SFEN). Elle possède également de l'uranium de retraitement (URT) qui pourrait faire fonctionner les réacteurs pendant 2 ans ainsi que de l'uranium appauvri pour les faire fonctionner pendant plusieurs années supplémentaires. (EDF)

Pas de différence discriminante entre les deux scénarios :

- La question d'indépendance n'est pas une question de volumétrie mais de géopolitique, le fait de réduire nos besoins en approvisionnement d'uranium naturel de 10 à 20% ne change pas fondamentalement la nature de la dépendance de la France. (Negawatt)
- La France est dépendante de l'extérieur pour son approvisionnement d'uranium naturel puisqu'elle ne possède plus de mines d'uranium sur son territoire. (Global Chance, Greenpeace, IRSN)
- L'approvisionnement en uranium naturel est diversifié mais il dépend en grande partie de pays dont le régime politique peut être instable (Niger) ou dont le caractère démocratique peut être remis en question (Kazakhstan). (Greenpeace)
- Pour la partie uranium, le cycle aval de la France dépend aujourd'hui d'une usine unique, située en Russie pour la conversion de l'URT (Global Chance, Greenpeace, IRSN). L'eupéanisation de la filière serait effectivement un moyen de rendre la France plus souveraine (Global Chance, IRSN). Néanmoins, les opposants au traitement-recyclage interrogés restent sceptiques sur la réalisation de cette hypothèse dans le futur. (Global Chance, Greenpeace)
- Dans une situation de crise d'approvisionnement d'uranium naturel enrichi (UNE), il n'est aujourd'hui pas possible de faire tourner les réacteurs exclusivement avec du MOX ou avec du MOX et de l'URE en même temps (études préalables nécessaires pour y parvenir). (IRSN)

La littérature existante sur le sujet reprend globalement les arguments énoncés par les parties prenantes.

Le rapport du CEA (2018), étudiant l'inventaire prospectif selon différents scénarios d'évolution, estime qu'un cycle URT+Pu permet une économie de 20% sur la consommation d'uranium naturel. Ce chiffre se rapproche des données fournies par EDF dans le cadre de l'étude avec une quantité d'uranium naturel de 9400t en cycle ouvert contre 7170t en cycle URT+Pu (économie d'environ 24%). Le rapport du HTCISN avance que le retraitement a permis d'économiser 18 000t d'uranium naturel depuis sa mise en place (HTCISN, 2018).

La CNE2 a récemment écrit sur le sujet (CNE2, 2022) et rappelle que la stratégie française en matière de production électronucléaire a été définie pour l'essentiel dans les années 1970 pour répondre à un objectif de souveraineté énergétique, peu après le choc pétrolier de 1973. La CNE2 avance cependant que la stratégie de la France a connu un point d'inflexion, puisqu'en raison d'un prix de l'uranium relativement faible, l'arrivée des RNR a été repoussée au siècle prochain. Elle conclut que le choix entre la fermeture du cycle et un cycle ouvert repose sur un arbitrage entre la souveraineté énergétique et la limitation des investissements à effectuer (et donc *in fine* le coût de l'électricité). Cette conclusion est cependant sous réserve d'accéder aisément et durablement à de l'uranium à bas prix. Une hausse importante du prix remettrait en question cet arbitrage puisque le cycle ouvert deviendrait plus cher.

Sur ce point, les tendances d'évolution du cours de l'uranium prévoient une hausse dans les décennies à venir mais restant à un niveau relativement bas. La plupart des études économiques ne considèrent pas la disponibilité de l'uranium naturel comme un facteur limitant pour le siècle à venir (Taylor et al., 2022). Cependant, l'abondance de la ressource uranium pourrait évoluer et il convient de tenir compte du contexte actuel dans lequel la demande énergétique devrait fortement augmenter (AIEA⁵⁰, SFEN⁵¹, CNDP⁵²). A niveau de consommation d'uranium constante, la ressource serait suffisamment abondante pour le siècle (AIEA). Néanmoins, le nucléaire étant une énergie décarbonée et dans un contexte d'électrification de l'économie, son recours pourrait augmenter dans le monde dans les décennies à venir. Cette hausse de la demande pourrait à terme menacer la disponibilité de la ressource⁵³.

La SFEN écrivait dans un rapport sur la souveraineté énergétique de la France que l'indépendance énergétique se mesure en considérant les stocks, les coûts et les flux (SFEN, 2022)⁵⁴. En termes de stocks, les auteurs rapportent qu'EDF possède 2 ans de réserve d'uranium (contre 6 mois de réserve d'hydrocarbure) et Orano dispose d'un stock d'uranium appauvri qui peut se substituer à 7 à 8 ans de consommation d'uranium naturel, ce qui représente au total 10 ans de production sur son territoire en cas de rupture d'approvisionnement⁵⁵. En matière de coûts, le coût de l'uranium représente 5% du coût total de l'électricité produite. S'agissant des flux, les sources d'approvisionnement d'EDF sont diversifiées de la mine à la fabrication, ce qui limite le risque de crise d'approvisionnement. L'étude SFEN illustre le propos au travers de données : les volumes importés en France étaient très variables de 2016 à 2019, ce qui n'a pas rendu la production électronucléaire moins stable (aux alentours de 380 TWh par an). Enfin, les auteurs indiquent que seule une fraction des ressources en uranium naturel disponibles des pays exportateurs sera consommée de 2020 à 2040, ce qui ne met pas, en dehors de potentiels chocs, en péril la France sur son approvisionnement (SFEN, 2022).

Les opposants ont également étudié la question de la souveraineté française. Dans un rapport intitulé "la triple dépendance énergétique de la France" (Laponche et Zerbib, 2023), Global Chance indique que la France est très dépendante de l'extérieur pour son approvisionnement en uranium naturel ou de retraitement enrichi et en assemblage de combustible pour les réacteurs. L'approvisionnement en uranium naturel repose exclusivement sur l'étranger puisque la France ne possède plus de mine sur son territoire. L'étude rapporte qu'entre 2005 et 2020, 92.5% des importations

⁵⁰ <https://www.iaea.org/fr/newscenter/news/luranium-future-source-denergie-durable>

⁵¹ <https://www.sfen.org/vos-questions/y-a-t-il-un-risque-de-penurie-duranium-dans-le-monde/>

⁵² https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-ppe/file/1562/reserves_uranium.pdf

⁵³ L'AIEA souligne toutefois qu'il existe des méthodes, non conventionnelles mais coûteuses, pour récupérer de l'uranium et qui ne sont pas incluses dans le calcul de la disponibilité de la ressource initialement. Le paramètre clé reste le prix de la source qui justifie ou non des méthodes d'extraction coûteuse.

⁵⁴ Nucléaire et indépendance énergétique - Sfen

⁵⁵ Source : SFEN, 2021. Un pilier de la souveraineté énergétique.

de la France en uranium naturel provenaient des 6 pays suivants : Kazakhstan, Australie, Niger, Ouzbékistan, Namibie, Canada. Les auteurs avancent que cette liste compte des pays qui sont instables sur le plan politique ou entretiennent des relations étroites avec la Russie. S'agissant de la fabrication de MOX et de l'économie d'uranium associée, Global Chance rappelle qu'entre 2018 et 2021, la production annuelle moyenne de MOX en France a été de 70.75t (51t en 2021) contre 128.39t en moyenne annuelle entre 2011 et 2017 (ASN, 2012 à 2022⁵⁶). Ce point est discuté dans la revue documentaire de la section suivante qui porte sur la fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique. La dépendance de la France pour la conversion et l'enrichissement de l'URT est également soulevée par les auteurs de Global Chance.

5.4.1.2. Fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

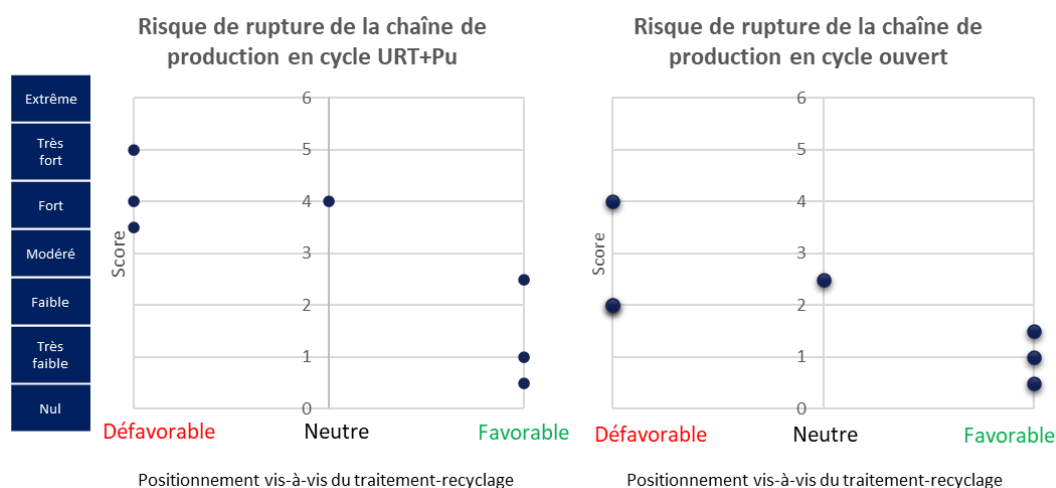


Figure 10 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur fiabilité de la production électronucléaire

Les résultats montrent des divergences d'opinions, y compris au sein des parties prenantes défavorables. Certaines d'entre elles estiment que le risque de rupture est bien plus élevé en cycle URT+Pu qu'en cycle ouvert et d'autres que ce risque reste fort dans les deux scénarios. Une partie prenante neutre indique également que le niveau de risque est plus fort en cycle URT+Pu qu'en cycle ouvert. Enfin, les parties prenantes favorables affirment que ce risque est faible voire très faible dans les deux cas.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

⁵⁶ Rapports de l'ASN - 25/05/2023 - ASN

Principaux arguments pour les scores du sous-indicateur "risque de rupture de la chaîne de production" de l'indicateur "fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique" : 3 visions distinctes émergent

Un risque de rupture faible dans les deux cycles :

- Le cycle URT+Pu implique un système industriel plus complexe qu'en cycle ouvert (EDF). Cependant, en cas d'arrêt du recyclage, la production électronucléaire ne s'arrêtera pas car les industriels ont des parades pour gérer les aléas comme par exemple les stocks présents sur le territoire ou encore les leviers contractuels mis en place. (Orano, EDF)
- Tous les réacteurs peuvent fonctionner avec du combustible à l'uranium naturel enrichi. Cela signifie qu'en cas d'arrêt du traitement-recyclage et après consommation des stocks constitués au préalable, l'URE et le MOX peuvent être substitués par de l'UNE. (EDF)
- En cycle ouvert, il faudrait construire davantage de piscines qu'en cycle URT+Pu, ce qui posera un problème d'acceptabilité sociale et environnementale. (EDF, Orano) Bien que cette construction soit longue, elle serait cependant anticipable et maîtrisable (notamment car sur le sol national). (Orano, EDF, Sauvons le climat)
- Le seul risque de rupture serait une rupture de l'expédition des combustibles des centrales mais il n'y a pas de différence entre les deux scénarios et le risque est quasiment nul. (Sauvons le climat)
- Il n'y a pas de raison que ce soit différent d'un cycle à l'autre car l'anticipation et le savoir-faire des industries limitent le risque de rupture. (Orano)

Un risque de rupture fort en cycle URT+Pu et bien moins élevé en cycle ouvert :

- Des acteurs soulignent que le cycle URT+Pu présente un risque de rupture dans la chaîne de production qui peut découler de problèmes à Melox (à l'instar des dernières années avec les problèmes de fabrication du MOX) (Greenpeace, Negawatt, IRSN) ou encore du vieillissement des installations de l'usine à La Hague (récentes ruptures dans la disponibilité d'équipements et d'ateliers, telle que la corrosion des évaporateurs⁵⁷) (Negawatt, IRSN). Ces usines, en nombre très limité, étant très complexes, elles pourraient également faire face à d'autres problèmes à la suite de leur exploitation. (IRSN)
- Le cycle ouvert est plus simple à gérer puisqu'il n'y a pas la présence d'usines complexes comme celles de Melox et de La Hague. (Negawatt, IRSN) Ce cycle permet ainsi l'économie de manipulations, transports et entreposages complexes. (Negawatt)
- En cycle ouvert, l'entreposage à sec a une logique industrielle plus facile car il permet d'agrandir les capacités au fur et à mesure et présente l'avantage d'être complètement passif, bien que cela prenne plus de place. (IRSN)
- Le cycle ouvert est plus souple et présente un risque de rupture faible. Les autres pays entreposent leur CU dans des conteneurs mais le risque de rupture reste faible avec un entreposage en piscine. Il faudrait cependant que les piscines se construisent en temps raisonnable et qu'elles se remplissent progressivement. (Greenpeace)

Un risque de rupture fort dans les deux scénarios :

- Le traitement-recyclage est devenu la variable d'ajustement pour empêcher la saturation des piscines, ce qui n'est pas une solution viable. (Global Chance)
- Un cycle ouvert ne modifierait pas le niveau de risque car le volume de combustible utilisé serait tout de même trop élevé et que nous manquons de solutions immédiates puisque l'entreposage à sec n'est pas envisagé dans le scénario. L'intérêt de cet entreposage est un temps court de mise en œuvre contre 12 à 14 ans pour une piscine. (Global Chance)

⁵⁷ Corrosion des évaporateurs concentrateurs de produits de fission de La Hague - 03/09/2021 - ASN

Revue documentaire

La littérature sur le sujet est peu dense. Un rapport de l'IRSN met en avant les difficultés rencontrées par l'usine Melox depuis quelques années, entraînant une baisse de production annuelle de combustibles MOX et une hausse importante du nombre de rebuts de MOX. Un rebut de MOX est un combustible MOX qui n'est pas conforme aux normes d'utilisation. Ces rebuts sont en partie réutilisés dans le cycle de l'usine de Melox pour recréer des combustibles MOX, l'autre partie ne pouvant être recyclée directement à l'usine Melox est destinée à être entreposée à l'usine de La Hague dans l'attente d'un recyclage ultérieur. L'IRSN explique que ces défauts de production proviennent notamment de l'utilisation de poudre d'UO₂ issue d'un procédé à voie sèche et des pannes fréquentes des équipements de l'usine Melox qui sont difficiles à résoudre à cause de l'absence de certaines redondances dans la conception de l'usine et des doses limites imposées aux travailleurs (IRSN, 2022). En réponse à ce problème, Orano a débuté la construction d'un nouvel atelier à Malvési pour produire de la poudre d'UO₂ par voie humide et a présenté en 2021 des actions visant à réduire les débits de doses aux postes de travail afin d'améliorer la maintenance des équipements (IRSN 2022). Par ailleurs, Melox a d'ores-et-déjà rebasculé en voie humide (UO₂ produit à Vasteras en Suède) sans attendre ce nouvel atelier. Ajouté aux effets positifs des plans d'actions déjà mis en œuvre et en cours, la production de MOX se redresse progressivement depuis 2022 et dépassera sur l'année 2023 les 75 tML, remontée qui devrait se poursuivre dans les années à venir.

Il convient de noter que la documentation identifiée traite uniquement des problèmes actuels et ne permet pas d'apporter d'éléments complémentaires sur la fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique future, notamment au regard des futures installations de traitement-recyclage dans le scénario "cycle URT+Pu".

En cycle ouvert, la construction de plusieurs piscines d'entreposage de combustibles usés (au moins 19) entrainerait de lourdes procédures administratives, notamment pour obtenir les autorisations de construction, et poserait un enjeu d'acceptabilité important.

Dans le cadre du projet de création de la nouvelle piscine d'entreposage de combustibles usés porté par EDF sur le site de l'usine de La Hague, le calendrier prévu avant la livraison de la piscine montre que le processus est chronophage et complexe. En 2017, EDF a en premier lieu soumis un dossier d'options de sûreté (DOS) à l'ASN qui a rendu son avis en 2019 (EDF⁵⁸). En 2021, EDF a saisi la CNDP qui a décidé de mettre en œuvre une concertation préalable qui a commencé en novembre 2021 et s'est achevée en juillet 2022. La demande d'autorisation de création (DAC) devrait désormais être déposée fin 2023. Dans l'attente d'une enquête publique qui pourrait avoir lieu en 2025, EDF poursuit l'information et le travail sur l'amélioration du projet, en relation avec le territoire, dans le cadre d'une concertation continue. La décision d'autorisation ou non du projet par l'Etat suivra l'enquête publique. Enfin, les travaux devraient durer jusqu'en 2034, date prévisionnelle de la mise en service de la piscine. Au total, il faudrait ainsi (d'après le planning prévisionnel d'EDF) une quinzaine d'années pour mettre en service une piscine d'entreposage de combustibles usés. Cela s'explique par les nombreuses démarches administratives mais également par l'ensemble des débats et enquêtes publics qui doivent être organisés avec les acteurs territoriaux. Il conviendrait par conséquent en cycle ouvert de concilier la multiplication de ces procédures pour construire un nombre important de piscines d'entreposage de combustibles usés avec les besoins de capacité d'entreposage nécessaire pour garantir la continuité de la chaîne de production du cycle.

5.4.2. - Leadership scientifique et industriel de la France

Le critère de leadership scientifique et industriel est mesuré par trois indicateurs : le niveau de compétence humaine (scientifique et industrielle), le niveau de R&D (se reflétant par les brevets, publications scientifiques et partenariats industriels) et le niveau de rayonnement de la France à l'international.

Les parties prenantes interrogées sur ce critère sont des experts directement impliqués ou ayant une bonne connaissance du sujet de par leur expérience et pouvant apporter des éléments de nuance. Pour chaque indicateur, les scores élicités et les arguments recueillis sont présentés pour éclairer le choix des scores des différentes parties prenantes. L'échelle de score utilisée demeure l'échelle de Loekart de 0 à 6. 0 signifie impact nul et 6 signifie impact

⁵⁸ <https://projet-piscine.edf.fr/pages/le-calendrier-du-projet>

extrême. Pour les indicateurs "compétence humaine", "niveau de R&D" et "rayonnement de la France à l'international", un score de 0 signifie que le cycle performe mal (niveau nul) alors qu'un score de 6 signifie l'inverse (niveau extrême).

5.4.2.1. Niveau de compétence humaine

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

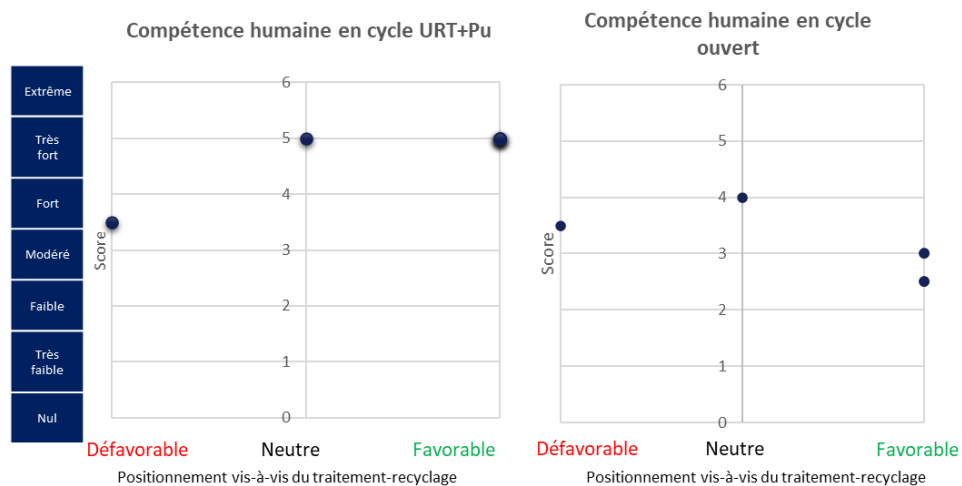


Figure 11 : nuage de points des scores énoncés en entretien sur l'indicateur niveau de compétence humaine

Une partie prenante défavorable indique un niveau qui semble à première vue identique entre les scénarios. Les réponses de l'acteur interrogé étaient cependant dynamiques sur cet indicateur avec un niveau de compétence fort en cycle URT+Pu puis allant vers un niveau modéré (sur la compétence de traitement-recyclage) et un niveau modéré en cycle ouvert allant vers un niveau fort (sur la compétence de stockage). Les parties prenantes favorables avancent au contraire que la compétence est très forte grâce notamment au traitement-recyclage et irait vers un niveau modéré en cycle ouvert. Dans une moindre mesure, une partie prenante neutre donne une tendance similaire en considérant que le niveau de compétence resterait tout de même fort dans la gestion du combustible.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur "niveau de compétence humaine" : une tendance majoritaire en faveur du cycle URT+Pu nuancée par un opposant

La majorité des répondants pensent que le niveau de compétence est bien plus élevé en cycle URT+Pu :

- La France est le seul pays à maîtriser le traitement-recyclage à l'échelle industrielle dans un monde où la plupart des pays ont un niveau de compétence industrielle modéré en matière de nucléaire et de traitement-recyclage en particulier. (EDF, CEA, SFEN, gestionnaire de déchets étranger)
- Les compétences scientifiques se doivent d'être élevées pour accompagner les industriels pour le fonctionnement des usines en cycle URT+Pu. (Orano, EDF, CEA)
- Les compétences en chimie utilisées dans le traitement-recyclage peuvent également servir pour d'autres applications : recyclage de batterie, production d'isotopes médicaux, etc. Les compétences mobilisées bénéficient ainsi à d'autres secteurs. (EDF)
- Un passage en cycle ouvert impliquerait la perte progressive mais conséquente des compétences en matière de traitement-recyclage, surtout avec les départs à la retraite. (CEA, EDF)
- Une fois en cycle ouvert, un retour en arrière serait très difficile. La France a mis 50 ans pour acquérir ses compétences industrielles. Si la France perd ses compétences et qu'elle souhaite revenir vers le traitement-recyclage, il faudra retrouver le niveau de compétences nécessaires, ce qui demande un investissement important et long, voire de faire appel aux compétences de pays étrangers avec la perte d'indépendance que cela suppose. (EDF)
- Le niveau de compétence de la France pourrait atteindre un score extrême mais il manque des moyens investis pour y parvenir. (Orano)

L'opposition évoque le déclin existant des compétences et la place du retraitement dans le monde :

- La France est le pays qui maîtrise le mieux le traitement-recyclage mais ce n'est pas l'expertise à valoriser dans un contexte où le nucléaire est en stagnation voire en déclin dans le monde, où cette stratégie de gestion du combustible a reculé partout, et où l'enjeu majeur est l'élimination maîtrisée de stocks accumulés. (Negawatt)
- Les marchés internationaux sont beaucoup tournés vers l'entreposage sûr et le stockage de l'existant, y compris les matières accumulées. Il y a donc un vrai potentiel pour atteindre un niveau de compétences élevé en cycle ouvert, d'autant que la France fait partie des pays les plus avancés sur le sujet. (Negawatt)
- La France fait face à une perte de compétences depuis plusieurs années dans la filière nucléaire, ce qui questionne sur la capacité de la France à reconduire la stratégie actuelle en maîtrisant la construction de nouvelles usines de retraitement et de fabrication de nouveaux combustibles. (Negawatt)
- L'expertise technique et la compétence décrite aujourd'hui en matière de traitement-recyclage ne se traduit pas en termes de maîtrise de trajectoire des inventaires (notamment sur les flux de plutonium qui ne sont pas à l'équilibre, le stock augmentant de façon non maîtrisée en regard des capacités d'entreposage et de réutilisation). (Negawatt)

Revue documentaire

PwC décrit la forte compétence scientifique et industrielle de la France en mentionnant qu'Orano est un leader mondial de l'amont et de l'aval du cycle du combustible (PwC, 2011).

Les auteurs abordent néanmoins la perte de compétences en mentionnant qu'en 2009, 40% des effectifs d'EDF partiraient à la retraite d'ici 2015 contre 16.5% pour Orano. Ces chiffres sont nuancés dans le même rapport qui indique que le nombre d'ingénieurs dans la filière nucléaire avait été multiplié par 3 en 4 ans. La création du master "nuclear energy", en partenariat notamment avec EDF, Orano et Framatome, a pu constituer un levier pour le développement des compétences humaines en attirant de nombreux étudiants nationaux et étrangers.

La CNE2 évoque plus récemment cette perte de compétences dans la filière en documentant que les effectifs liés à la recherche dans le nucléaire au CNRS avaient baissé de 30% en 5 ans (CNE2, 2022). Les auteurs l'expliquent notamment par le faible nombre de projets dans le nucléaire impliquant des laboratoires universitaires (seulement 2 universités

d'excellence). Ces derniers ne possèdent pas les installations nécessaires pour manipuler des matières radioactives et faire de la recherche sur ces sujets.

De telles installations sont peu nombreuses en Europe. La France dispose d'un laboratoire unique au monde, Atalante à Marcoule, qui est, avec Karlsruhe en Allemagne (Centre de Recherche Commun de l'Union Européenne), l'un des seuls sites de recherche en Europe sur lequel il est possible de manipuler d'importantes quantités de matières radioactives. Le rapport de la CNE2 conclut en rappelant qu'il est nécessaire de maintenir un rythme continu de réalisation de nouveaux projets afin d'éviter de perdre en compétences et savoir-faire.

5.4.2.2. Niveau de R&D

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

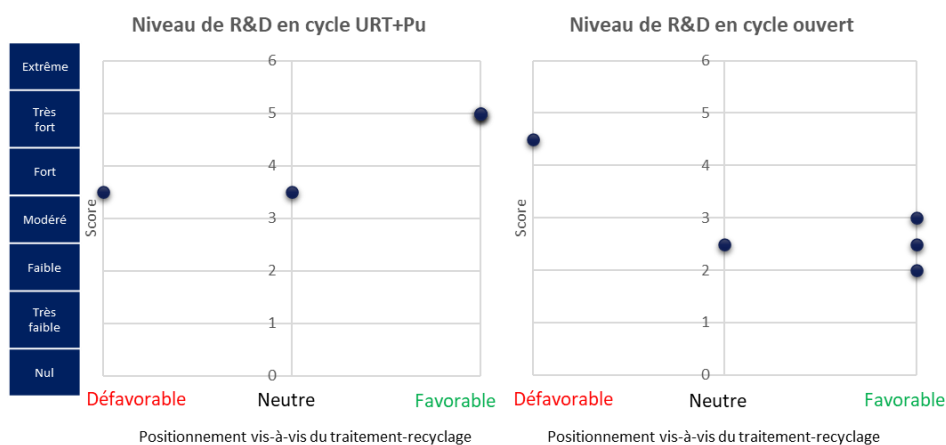


Figure 12 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur niveau de R&D

Les conclusions en matière de scores sont relativement similaires à celles exposées pour le premier indicateur. Une partie prenante défavorable évoque un niveau de R&D fort se dirigeant vers un niveau modéré dans un cycle avec mono-recyclage tandis qu'un niveau fort voire très fort pourrait être atteint en cycle ouvert. Les parties prenantes favorables affirment quant à elles que le niveau est actuellement très fort et qu'il deviendrait modéré voire faible en cycle ouvert. Enfin, une partie prenante neutre s'accorde avec la vision des parties prenantes favorables en modérant le niveau de R&D d'aujourd'hui.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur "niveau de R&D" : une tendance majoritaire en faveur du cycle URT+Pu mais nuancée

La France possède un niveau de R&D très élevé grâce au traitement-recyclage :

- Le CEA a déposé et dépose beaucoup de brevets en lien avec le traitement-recyclage. (CEA, EDF)
- Une grande partie des animations scientifiques sur les sujets de traitement-recyclage et du nucléaire sont faites par la France. (CEA)
- En cycle ouvert, le CEA réaliserait bien moins de publications et de brevets et perdrait des partenaires importants comme le Japon. (CEA)
- La France perdrait l'avance technologique qu'elle possède sur plusieurs procédés si le cycle était ouvert. (CEA, Orano, EDF, SFEN, gestionnaire de déchets étranger)
- L'étude de faisabilité du multi-recyclage en REP par les acteurs du cycle du combustible et demandée par la PPE actuelle requiert un haut niveau de R&D qui permet à la France de développer encore son niveau de compétences, son rang de leader et son indépendance. (EDF)
- La France dispose de compétences et d'expérience sur la technologie RNR grâce en partie à un niveau de R&D important qu'il faut maintenir et développer 1) en vue du multi-recyclage en RNR (voir en REP au préalable) en France pour fermer le cycle et rendre le pays globalement indépendant et 2) pour maintenir son avance dans le domaine du nucléaire. (EDF)

Le niveau de R&D est fort mais il est nécessaire de réinvestir rapidement pour le maintenir :

- Le CEA a fait face ces dernières années à une perte de moyens et de connaissances, surtout depuis l'arrêt du projet d'ASTRID (gestionnaire de déchets étranger)

La France est en pointe sur la filière mais est peut-être en train de commettre une erreur stratégique :

- Il est raisonnable de faire de la R&D pour aller vers un scénario, mais il est risqué de réaliser un scénario et de compter sur la R&D. (Negawatt)
- Il n'est pas prudent de ne compter que sur l'option des RNR. Il faut également réaliser de la R&D sur le conditionnement de la poudre de plutonium au cas où les RNR, qui n'ont jamais percé industriellement dans le monde depuis plus de cinquante ans, ne verraient pas le jour. (Negawatt)
- En cycle ouvert, la France se détacherait de l'unique stratégie d'aller vers les RNR en se diversifiant et en réorientant la recherche dans davantage de domaines, ce qui ferait augmenter le niveau de R&D en France. (Negawatt)

Revue documentaire

Peu de littérature a pu être identifiée sur le niveau de la recherche et du développement des activités du cycle du combustible en France.

Des données relatives au nombre de brevets déposés et publiés par le CEA sur l'aval du cycle ont été transmises dans le cadre de cette étude. Une moyenne glissante sur 3 ans a été calculée par le CEA sur la base d'un historique de 20 ans. Ces données se découpent en trois activités : portefeuille "Aval du Cycle Actuel" (activités de soutien aux installations de traitement-recyclage et fabrication de MOX), portefeuille "Aval du Cycle Futur" (activités de recherche sur les procédés innovants de traitement-recyclage) et portefeuille Assainissement-Démantèlement-Emballage-Transport qui intègre les activités de soutien aux installations d'entreposage et stockage. Une pondération de 0,85 a été appliquée à la moyenne du dernier portefeuille afin de ne pas inclure les 15% de brevets déposés spécifiques à l'Assainissement-Démantèlement des installations.

Le nombre de brevets déposés par le CEA ces 20 dernières années pour le soutien aux installations de traitement-recyclage est estimé à 1 à 3 brevets par an avec une moyenne récente située entre 1 et 2 par an. S'agissant des activités liées aux procédés innovants, le CEA a déposé entre 1 et 10 brevets par an (moyenne récente autour de 4). Enfin, les

activités de soutien aux installations d'entreposage et de stockage ont permis au CEA de déposer 4 à 11 brevets par an avec une moyenne récente autour de 4,5.

Ces données fournissent un ordre de grandeur sur le niveau d'activité du CEA sur l'aval du cycle qui serait bien moindre en cycle ouvert (cf. résultat des entretiens dans la section 5.1.2. -). Des données complémentaires tels que les revenus issus de partenariats ou encore les publications scientifiques n'ont pu être collectées. Les entretiens ont toutefois mis en évidence que le CEA perdrait indéniablement des partenaires stratégiques et des moyens en cas de transition vers un cycle ouvert, qui ne seraient pas compensés par le surplus d'activités de recherche sur l'entreposage et le stockage, lesquelles sont déjà actives, le stockage direct des combustibles usés étant une hypothèse prise en compte par l'ANDRA.

Ces chiffres montrent également que les recherches sur le cycle futur (procédés innovants, MRREP, fermeture du cycle, transmutation, etc.) permettent au CEA de générer un nombre important de brevets. Le rapport de la CNE2, précédemment cité, observe qu'il existe actuellement une dynamique importante de recherche autour de petits réacteurs modulaires de type SMR et AMR à laquelle le CEA contribue.

Le Sénat et l'Assemblée nationale discutent de la perte de compétence en matière de R&D dans un rapport consacré à l'abandon du projet ASTRID. Les auteurs avancent que cet abandon pourrait avoir des conséquences dans la mesure où il serait impossible de réagir à temps pour lancer un projet de RNR suite à un éventuel choc sur le marché de l'uranium (Gassilloud et Piednoir, 2021). Il serait d'abord nécessaire de relancer un cycle d'étude, ce qui prendrait plus d'une dizaine d'années en supposant que les 70 ans de connaissances accumulées sur le sujet ne soient pas déjà perdues. Le Sénat estime qu'il existe un risque élevé que ces compétences acquises se perdent rapidement et que le redémarrage d'un tel projet prenne au moins un quart de siècle.

Les éléments mis en lumière par ce dernier rapport montrent que le maintien du niveau de R&D lié aux RNR constitue un véritable enjeu et que des retours en arrière sont complexes compte tenu de la perte rapide des savoirs et savoir-faire.

5.4.2.3. Rayonnement de la France à l'international

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogées.

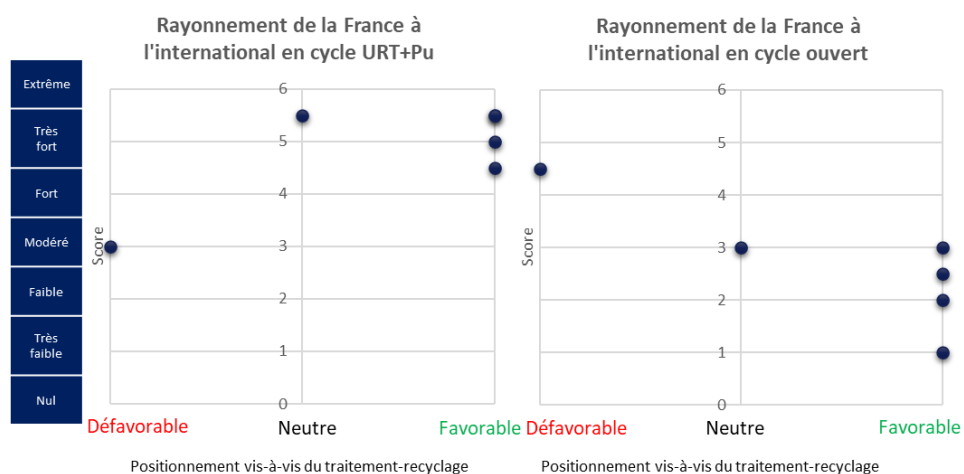


Figure 13 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur rayonnement de la France à l'international

Les conclusions sont similaires aux deux premiers indicateurs mais avec des différences plus marquées entre les deux scénarios. Une partie prenante défavorable exprime une nouvelle fois un score en dynamique avec un niveau de

rayonnement modéré/fort allant vers un niveau faible en cycle avec mono-recyclage et un niveau fort voire très fort en cycle ouvert. Les parties prenantes favorables et une partie prenante neutre s'accordent à dire que ce niveau se situe actuellement entre fort et extrême et qu'il pourrait devenir en cycle ouvert modéré à faible voire très faible pour certains.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur "rayonnement de la France à l'international" : une tendance majoritaire en faveur du cycle URT+Pu contrastée par un opposant

La France est une référence à l'international grâce au traitement-recyclage selon la majorité des répondants :

- La France est le seul pays à réaliser le traitement-recyclage à l'échelle industrielle dans le monde occidental. (Orano, EDF, CEA, SFEN, gestionnaire de déchets étranger)
- La France est beaucoup sollicitée à l'international pour expliquer le fonctionnement des usines de traitement-recyclage et des réacteurs moxés en France. La France dispose aussi d'expérience et de compétences sur les réacteurs de type RNR. (EDF)
- Le rayonnement est important pour vendre la compétence à l'étranger et pourrait encore augmenter. En se référant au contexte climatique, la tendance pour le nucléaire sera encore plus importante dans le futur et des pays pourraient chercher à fermer leur cycle. (Orano, EDF)
- Un passage en cycle ouvert serait un coup de tonnerre dans le monde et conduirait à une perte de rayonnement progressive mais conséquente, possiblement au profit de la Chine par exemple qui souhaite développer la fermeture de son cycle. (CEA)
- La France se retrouverait alors au même niveau que les autres pays qui pratiquent le cycle ouvert. (EDF, Orano, CEA, gestionnaire de déchets étranger)

Le rayonnement est plutôt fort mais grâce aux compétences françaises de stockage :

- La source de rayonnement de la France à l'international provient plutôt de sa position forte sur le stockage définitif (3^{ème} au monde, en termes d'avancement vers l'autorisation et l'opérationnalité, derrière la Finlande et la Suède). (Negawatt)
- Le maintien du mono-recyclage de l'uranium et du plutonium est de nature à faire baisser le rayonnement de la France à l'international car développer un stockage de CSD-V et CSD-C limite le transfert de technologie à l'étranger puisque les autres pays ne font pas de traitement-recyclage des CU. (Negawatt)
- Ouvrir le cycle permettrait de se développer sur le stockage définitif du combustible usé et d'augmenter le rayonnement de la France à l'international autour de ce sujet. (Negawatt)

Revue documentaire

Orano et EDF sont des acteurs industriels largement reconnus dans le monde, et notamment pour leur expertise de traitement-recyclage et de production électronucléaire à partir de réacteurs en partie moxés et à nouveau urtés depuis la reprise de la filière URT en 2023. PwC (2011) rappelle par exemple qu'en 2009, les mines d'Orano ont produit pas moins de 17% de la production mondiale d'uranium. L'entreprise française aurait par ailleurs enrichi l'équivalent de 22% de la production mondiale. Orano fournirait ainsi tout ou une partie du combustible nucléaire de 135 centrales nucléaires. A l'aval du cycle, les activités de l'usine d'Orano à La Hague représentaient à elles-seules en 2011 50% de la capacité mondiale de traitement-recyclage (PwC, 2011). Ce chiffre est aujourd'hui susceptible d'être plus important compte tenu de la fermeture de Sellafield au Royaume-Uni. Orano a par ailleurs une position de leader mondial sur l'entreposage à sec et vient de développer son nouveau modèle d'emballage TN Eagle qui a été agréé en 2023 par l'autorité de sûreté américaine (Orano⁵⁹).

⁵⁹ <https://www.orano.group/fr/actus/actualites-du-groupe/2023/novembre/l-emballage-nucleaire-tn-eagle-d-orano-agree-par-l-autorite-de-surete-americaine>

La France a été mobilisée pour la construction d'installations nucléaires, notamment en Finlande et en Chine, et est sollicitée régulièrement au travers d'appels d'offres pour constructions de nouveaux réacteurs. De plus, la France possède de nombreuses installations de recherche sur son sol et l'IRSN a noué 187 accords bilatéraux avec des organismes de recherche dans 36 pays (PwC, 2011).

Le rapport de la CNE (2022) soulève l'existence d'un réel enjeu géopolitique pour la France dans un contexte dans lequel des pays (notamment anglo-saxons) prévoient de remplacer leurs usines à charbon par des réacteurs nucléaires afin de répondre aux défis climatiques. Il existe ainsi un potentiel de rayonnement encore plus élevé pour le pays qui doit tout de même faire face à la concurrence de la Russie et de la Chine.

Ce rayonnement est cependant fragile et peut évoluer selon les décisions stratégiques de la France. Le projet ASTRID et son abandon illustrent les conséquences d'un changement de direction sur l'image du pays à l'étranger. Le rapport du Sénat et de l'Assemblée nationale (2021) affirme que le caractère soudain de cet abandon a pu soulever des questionnements à l'étranger sur la stabilité d'un partenariat industriel ou scientifique avec la France. Le Japon a depuis noué des liens avec les Etats-Unis pour le développement des SMR et AMR. Autrement dit, un changement de cycle en France pourrait créer un effet de choc pour les partenaires industriels du pays et émettre des doutes, ce qui pourrait profiter à d'autres pays comme la Russie.

S'agissant du rayonnement de la France sur le stockage et l'entreposage, peu d'informations ont pu être récoltées. La CNE rappelle que les pays anglo-saxons avec une filière nucléaire ont tous un cycle ouvert, montrant un potentiel de marché conséquent en cas de développement de cette compétence, d'autant que l'Europe est actuellement une région du monde dans laquelle des avancées réelles sont obtenues sur le stockage de déchet de haute activité (CNE, 2022).

5.4.3. - Intérêt porté aux générations futures

L'intérêt porté aux générations futures peut comporter une multitude de sujets. Dans le cadre de l'étude, deux dimensions sont susceptibles de varier entre les deux scénarios et sont étudiées ci-dessous : les déchets radioactifs laissés aux générations futures et le niveau probable des technologies et de la compétence industrielle laissées à ces mêmes générations. Le premier indicateur permet d'évaluer le meilleur scénario pour limiter la contrainte des déchets laissés aux générations futures. Il est séparé en deux sous-indicateurs dans l'analyse : 1) volume de déchets et 2) dangerosité des déchets. Le second indicateur vise à évaluer dans quelle mesure les scénarios étudiés positionnent les futures générations dans une situation plus ou moins confortable pour gérer au mieux leur production électronucléaire et leurs propres déchets. La valeur d'option, considérant la possibilité de développer le multi-recyclage en REP puis d'atteindre l'objectif de fermeture du cycle avec les RNR dans le scénario du cycle URT+Pu, est analysée dans ce même indicateur puisqu'un tel résultat aurait des implications pour le bien-être des générations futures (souveraineté, gestion des déchets, etc.).

La quasi-totalité des parties prenantes a été interrogée sur cet enjeu de société (à l'exception des acteurs territoriaux). Il était en effet important pour ce critère très débattu de recueillir une diversité d'opinions qui soit la plus représentative de l'écosystème d'acteurs impliqués sur les enjeux du cycle. Certains acteurs n'ont cependant pas souhaité se prononcer sur un score pour le premier indicateur. C'est notamment le cas des parties prenantes neutres.

Pour chaque indicateur, les scores élicités et les arguments recueillis sont présentés pour éclairer le choix des scores des différentes parties prenantes. L'échelle de score utilisée demeure l'échelle de Loekart de 0 à 6. 0 signifie impact nul et 6 signifie impact extrême. Pour les sous-indicateurs "volume de déchets" et "dangerosité des déchets", un score de 0 signifie que le cycle performe bien. En revanche, un score de 0 pour l'indicateur "niveau des technologies et de la compétence industrielle" implique que le cycle ne performe pas du tout.

5.4.3.1. Volume de déchets radioactifs laissés aux générations futures

Résultats des entretiens

Bien que l'indicateur porte uniquement sur les déchets, l'analyse ci-dessous évoque le volume de déchets et de matières radioactives afin de tenir compte des réponses de certaines parties prenantes qui parlent de déchets pour des éléments considérés comme des matières valorisables dans les hypothèses du scénario URT+Pu. La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

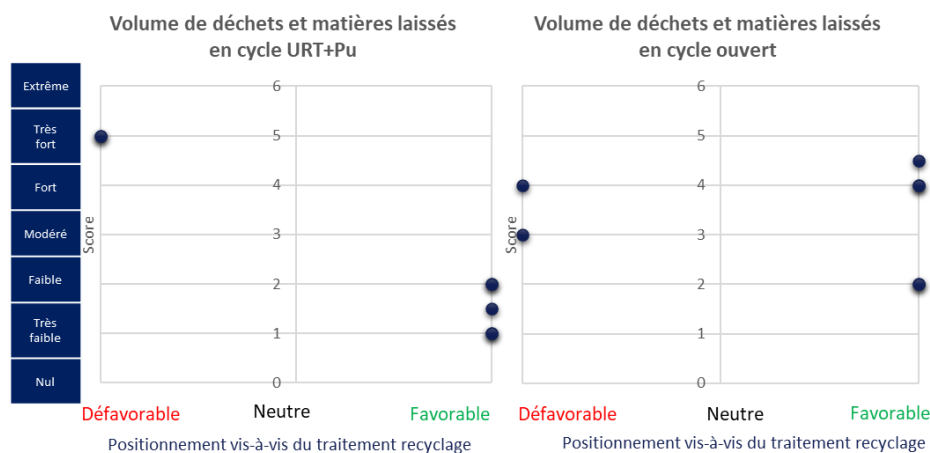


Figure 14 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur volume de déchets

Les parties prenantes défavorables indiquent que le volume de déchets est très fort en cycle URT+Pu et modéré à fort en cycle ouvert. Les parties prenantes neutres ont été interrogées mais n'ont pas souhaité se prononcer sur un score. Elles ont toutefois apporté des réponses qualitatives (cf. box ci-dessous). Enfin, les parties prenantes favorables s'accordent pour dire que le volume est bien plus élevé en cycle ouvert, à l'exception d'une partie prenante qui considère qu'il s'agit de volumes relativement faibles dans tous les cas (bien que plus élevés en cycle ouvert).

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores du sous-indicateur "volume de déchets" : deux visions qui s'opposent mais qui ne comparent pas les mêmes inventaires

Le volume de déchets est moins important en cycle URT+Pu avec quelques nuances :

- La diminution en volume et en toxicité des déchets les plus radioactifs et à vie longue est l'un des principaux objectifs du traitement-recyclage. C'est ainsi que le code de l'environnement (article 542-1-2 II-1°) stipule que : "La réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs est recherchée notamment par le retraitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs". (EDF)
- Tous déchets confondus (HA, MA-VL, TFA...), le volume total de déchets est relativement plus élevé en cycle URT+Pu en raison du nombre plus élevé d'usines en fonctionnement (ce qui génère plus de déchets FMA notamment). Le volume de déchets HA est en revanche moins élevé qu'en cycle ouvert. (EDF)
- Ce dernier point est également souligné par un autre acteur qui indique que même sans atteindre les RNR, le volume de déchets HA (les plus radioactifs) est inférieur en cycle URT+Pu par rapport au cycle ouvert. Cet acteur souligne par ailleurs que ce sont les déchets qui préoccupent généralement les générations futures du fait de leur niveau et de la durée de leur radioactivité. (CEA)

- En recyclant, on diminue le volume de déchets HA et MA-VL. (SFEN) Le volume d'assemblages de CU en cycle ouvert est plus important que le volume de CSD-V et CSD-C en cycle avec mono-recyclage. (gestionnaire de déchets étranger)
- En mono-recyclage, les déchets HA sont isolés et mis dans des CSD-V. Dans un cycle ouvert, ces déchets sont dans les combustibles usés. Le volume de conteneurs HA est donc plus faible en mono-recyclage qu'en cycle ouvert. Cependant, ces conteneurs (qui concentrent les éléments les plus radioactifs) devront être davantage espacés dans le stockage définitif (emprise) que les combustibles UNE usés compte tenu de leur puissance thermique. Par ailleurs, le retraitement a simplement séparé les éléments du combustible usé, il n'y a donc pas de différence significative entre les deux scénarios en termes de volume tous déchets confondus (hormis le plutonium qui est en partie "consommé" lors de l'irradiation des combustibles MOX). (IRSN)
- Passer en cycle ouvert augmenterait significativement les déchets HA mais ce n'est pas un problème incommensurable. Il y a en revanche un problème d'acceptabilité sociale, puisque le stockage définitif serait plus important en cycle ouvert. (Sauvons le climat)
- En passant au cycle ouvert, il faudrait stocker les MOX usés générés par le cycle actuel jusqu'en 2040, date de transition vers le cycle ouvert. (CEA) En cycle URT+Pu, seuls les MOX et URE sont à stocker sachant que leur valorisation est faisable via le multi-recyclage en RNR (voire en REP au préalable si les études en cours conformément à la PPE actuelle en démontrent la faisabilité technico-économique). (EDF)
- En cas de poursuite du mono-recyclage sans atteindre le multi-recyclage (en MRREP puis RNR) pour valoriser les combustibles MOX et URE usés, le gain en termes de volume de déchets HA par rapport au cycle ouvert sera cependant réduit. (CEA)
- Quel que soit le scénario, le volume de déchets rapporté au kWh produit est bien plus faible que pour les autres énergies. (EDF, Orano, Sauvons le climat)
- L'IRSN a fait des études sur le multi-recyclage avec les RNR (incluant en plus du plutonium certains actinides). Ces études ont indiqué que celui-ci permettrait de réduire le volume de déchets de type actinides générés d'un facteur 2 ou 3 (facteur qui peut être plus faible si un arrêt du nucléaire est intégré à la réflexion). (IRSN) Le traitement-recyclage permet de standardiser les déchets HA au stockage définitif, simplifiant la gestion de ces derniers. (Orano)

Le volume de déchets est plus important en cycle URT+Pu :

- Le cycle URT+Pu génère plus de déchets pour les générations futures car les MOX et URE usés doivent être comptabilisés dans la mesure où ils ne sont pas réutilisés aujourd'hui. (Greenpeace)
- Il y a par ailleurs une augmentation du volume car les opérations de retraitement vont entraîner la dispersion des éléments radioactifs sous d'autres formes un peu partout. (Greenpeace)
- Le volume de déchets, si tant est qu'il soit mesurable (volume brut, conditionné, sur-conditionné, colis + ouvrages... ?), est peu pertinent et le problème provient plutôt de la dispersion des déchets en cycle URT+Pu. Des déchets de nature diversifiée sont créés, ce qui complexifie leur gestion par rapport au cycle ouvert qui n'entraîne que des combustibles usés (au total, le volume d'ouvrage de stockage généré par la gestion des produits – déchets ou matières en attente – issus de la stratégie actuelle peut même être plus important qu'en stockage direct). (Negawatt)
- Nos générations laissent un stock de matières accumulées sans emploi (et plus particulièrement de plutonium) aux générations futures car les flux ne sont aujourd'hui pas à l'équilibre et que l'objectif des RNR ne sera probablement pas atteint. (Negawatt, Global Chance)
- La séparation du plutonium est productrice de déchets et le MOX est un amplificateur très important de transuraniens mineurs (américiums et curiums). (Global Chance)

Revue documentaire

Les données existantes sur les volumes de déchets présentées dans la section 5.1.1. - permettent de fournir quelques éclaircissements autour du débat exposé ci-dessus. Ces données du CEA et d'Orano sont rappelées ci-dessous :

Type de déchet ou matière / an	Cycle URT + Pu	Cycle ouvert
TFA en m ³	26 165	26 330
FMA-VC en m ³	14 363	14 696
FA-VL en m ³	980	1 052
MA-VL en m ³	694	215
HA - CSD-V en m ³	113	0
HA - CU en m ³	115 (MOX et URE usés)	591

Tableau 13 : volumes de déchets et matières valorisables, source : CEA, Orano

Le tableau montre qu'en termes de volume, peu de différence est observée entre les deux types de cycles pour les déchets TFA et FMA-VC. Le cycle ouvert génère plus de déchets FA-VL et surtout bien plus de combustibles usés qui sont des déchets dans ce scénario. En revanche, le cycle URT+Pu génère un volume plus important de déchets MA-VL mais un volume inférieur de déchets HA (113 m³/an contre 591m³ en cycle ouvert).

Le débat qui anime les parties prenantes tourne toutefois autour des MOX et URE usés qui sont considérés par les opposants comme des déchets et par les industriels comme des matières valorisables, entreposées le temps de développer une solution de recyclage. En considérant les MOX et URE usés comme des déchets, le volume de déchets HA s'élève à 228 m³/an en cycle URT+Pu contre 591 m³ en cycle ouvert.

L'écart significatif de déchets HA entre les deux cycles s'explique par les quantités plus importantes de combustibles usés générés en cycle ouvert et qui sont directement des déchets destinés au stockage après refroidissement. Les données du CEA et d'Orano utilisées (cf. Tableau 5) indiquent ainsi une masse de combustibles usés accumulés en fin de refroidissement de 95740 tml en cycle ouvert contre seulement 26631 tml en cycle URT+Pu.

5.4.3.2. Dangerosité des déchets radioactifs laissés aux générations futures

Résultats des entretiens

A l'instar du premier sous-indicateur, uniquement les déchets sont considérés. Les matières sont également mentionnées pour tenir compte des réponses de certaines parties prenantes qui parlent de déchets pour des éléments considérés comme des matières dans les hypothèses du scénario URT+Pu. La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur ce sous-indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

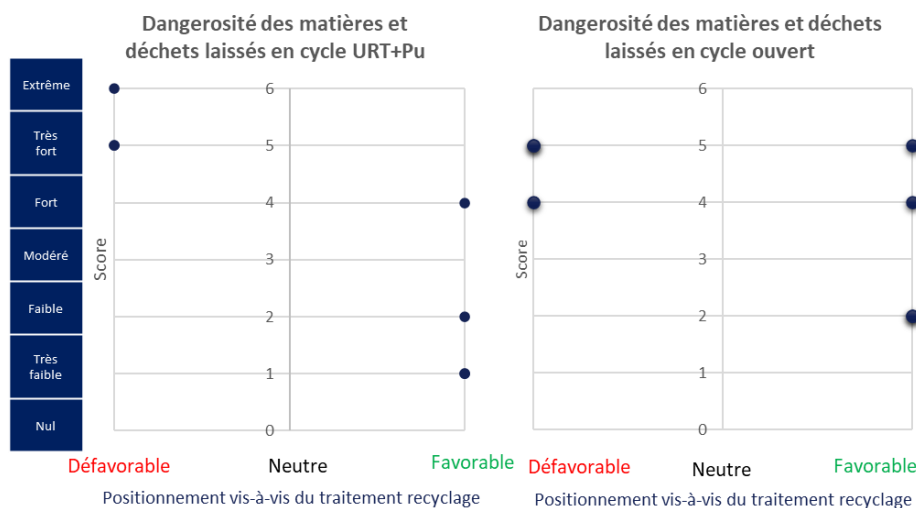


Figure 15 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur dangerosité des déchets

Les parties prenantes défavorables affirment que le niveau de dangerosité des déchets est très fort voire extrême en cycle URT+Pu. Ce niveau est moins élevé en cycle ouvert mais reste cependant élevé selon elles. Les parties prenantes neutres ont été interrogées mais n'ont pas souhaité se prononcer sur un score. Elles ont toutefois apporté des réponses qualitatives et soulignent l'absence de différence significative entre les deux cycles (cf. box ci-dessous). Enfin, les parties prenantes favorables fournissent des valeurs variables mais avec des conclusions similaires. Une partie prenante indique par exemple que le niveau est fort en cycle URT+Pu et très fort en cycle ouvert tandis que d'autres estiment que le niveau est très faible dans le premier cas et faible dans le second.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores du sous-indicateur "dangerosité des déchets" : trois tendances ressortent des entretiens

Le retraitement permet de réduire la dangerosité des déchets mais cela repose en partie sur le développement des RNR :

- Traiter et recycler le combustible usé conduit à une réduction de la radiotoxicité et de la thermicité du déchet qui sera stocké car le plutonium est retiré. (EDF, CEA, SFEN).
- En cas d'atteinte du multi-recyclage en RNR qui est l'objectif final visé, les MOX usés ne seraient pas mis au stockage définitif. Dans le cas contraire, la réduction de l'emprise au stockage est faible par rapport au cycle ouvert car le MOX usé est très thermique du fait de sa teneur en Pu 238 et en Am241 qui dégagent une forte chaleur lors de leur désintégration radioactive. Par ailleurs, l'atteinte de l'objectif de transmutation des actinides, complémentaire au multi-recyclage, permettrait de diminuer le niveau de radiotoxicité et l'emprise au stockage des déchets (notamment en retirant l'Am241). (EDF, CEA)
- Les CSD-V sont conçus pour le stockage de long terme et sont donc plus adaptés et sécurisés que le combustible usé. Si notre génération supporte le coût de traitement des déchets, c'est beaucoup moins coûteux pour les futures générations de gérer et stocker des déchets. (Orano)
- Le traitement-recyclage réalisé à La Hague permet de conditionner de manière standardisée (CSD-V, CSD-C, etc.) les déchets issus des combustibles usés présentant des caractéristiques différentes (géométrie, physico-chimie, etc.), ce qui simplifie la gestion des déchets. (Orano)
- Il n'existe pas de différence entre un CSD-V et un combustible usé en termes de dangerosité. Dans la mesure où le cycle actuel comptabilise moins de CSD-V que de combustibles usés en cycle ouvert, le cycle actuel est avantageux. (gestionnaire de déchets étranger)

Il n'existe pas de différence entre les deux cycles :

- La dangerosité des déchets est équivalente dans les 2 cycles car la radiotoxicité globale ne disparaît pas en faisant du traitement-recyclage, il y a toujours un stockage définitif à la fin, quel que soit le scénario. Le volume final de déchets à stocker va dépendre de plusieurs paramètres dans le futur comme la réalisation ou non du multi-recyclage, le maintien ou non du nucléaire en France, etc. (IRSN)
- Par ailleurs, la puissance thermique des CSD-V est bien plus élevée que celle des combustibles UNE usés car tous les éléments les plus radioactifs y sont concentrés. (IRSN)

La dangerosité des déchets est encore plus marquée dans le scénario avec mono-recyclage :

- Le cycle URT+Pu possède des étapes intermédiaires qui n'existent pas en cycle ouvert et qui produisent des déchets comme les produits de fission liquides ou encore la poudre de plutonium, qui est certes mieux gérée que d'autres déchets dangereux (chimiques par exemple), mais constitue de par sa très grande radiotoxicité l'un des déchets les plus dangereux. (Negawatt) La dispersion de ces matières sous différents états et sur différents sites complexifie la gestion (Negawatt, Greenpeace). Cela constitue un risque pour les générations futures si la capacité de les gérer est perdue ou bien si les exigences de sûreté diminuent. (Negawatt)
- L'argument consistant à justifier la stratégie de retraitement par la réduction de la radiotoxicité intrinsèque de l'inventaire destiné au stockage définitif, en extrayant le plutonium (qui domine cet inventaire à long

terme) plutôt que le laisser dans le combustible usé stocké en l'état, est fallacieux : ce choix implique de manipuler, transporter et entreposer cette matière, exposant beaucoup plus la population et les prochaines générations au danger que représente sa grande toxicité. (Negawatt)

- Il est plus optimal de concentrer les déchets en un point et de laisser la possibilité de les séparer si besoin plus tard, comme ce serait le cas en cycle ouvert. (Greenpeace).
- Les colis CSD-V sont dits irréversibles. Une fois scellés, il n'est pas possible de les récupérer, même si une solution alternative est trouvée pour leur gestion/stockage. De plus, la toxicité des CSD-V est égale à celle des combustibles usés. (Greenpeace)
- Les MOX irradiés renferment plus de 10 fois plus de produits très radioactifs et à vie longue (neptunium, américiums, curiums) que les UNE usés. Ils sont plus chauds, ce qui peut être dangereux dans le futur en l'absence de multi-recyclage et en cas de pépin au niveau du stockage. (Global Chance)

Revue documentaire

La dangerosité des déchets, dont les modalités de gestion s'étalent sur le temps long et concernent donc les générations futures, est liée à plusieurs caractéristiques : débit de dose au contact, radiotoxicité qui perdure sur le temps long, puissance thermique résiduelle. Ces caractéristiques impactent directement les modalités de gestion de ces déchets, depuis leur manipulation et leur transport jusqu'au dimensionnement de Cigéo.

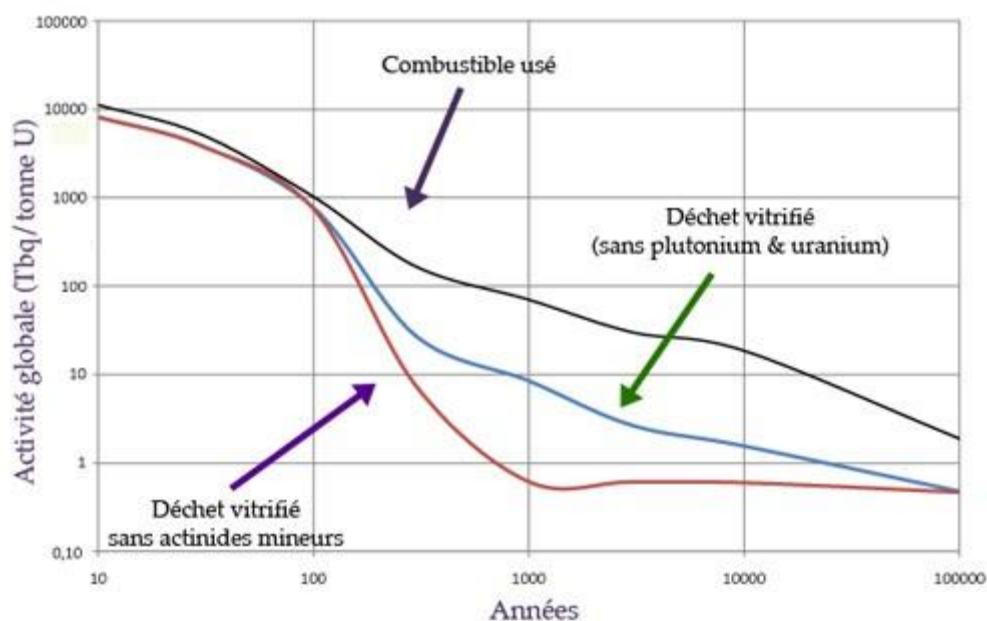


Figure 16 : décroissance radioactive par type de déchet, source⁶⁰ : CNRS/IN2P3 cité par Laradioactivité.com⁶¹

Le graphique ci-dessus montre les évolutions comparées des activités normées (par tonne d'uranium) de 3 types de déchets : combustible UNE usé géré comme déchet ; déchets vitrifiés issus du traitement à l'usine de La Hague du combustible UNE usé (pas de U ni de Pu) et déchets vitrifiés à partir de combustible usé dont on aurait extrait le Pu et U ainsi que les actinides mineurs.

La décroissance de l'activité du combustible UNE usé est plus lente que celle d'un déchet vitrifié. Au bout de 1 000 ans, l'activité de ce dernier est divisée par 8. Il faudra entre 5 000 et 10 000 ans pour qu'un déchet vitrifié atteigne le niveau de décroissance qu'un combustible usé n'atteindra qu'en 100 000 ans. Par ailleurs, le développement de la séparation poussée (permettant d'extraire les actinides mineurs) et de la transmutation en RNR (pour brûler les actinides mineurs

⁶⁰ Laradioactivité.com est un site internet repris et hébergé par l'Institut National de Physique Nucléaire et Physique des Particules (IN2P3/CNRS) depuis 2016.

⁶¹ https://laradioactivite.com/dechets_radioactifs/duree_dechets

si des combustibles adaptés sont développés) permettrait d'accélérer davantage la décroissance radioactive des déchets vitrifiés (courbe rouge).

Les déchets vitrifiés ont également une décroissance de puissance thermique plus rapide que les assemblages de combustibles UNE usés. La figure ci-dessous compare la puissance thermique (exprimée en kW) d'un CSD-V avec celle de 2,15 assemblages de combustible usé d'uranium (valeurs pour lesquelles la comparaison est rendue possible⁶²). Le traitement du combustible UNE usé permet ainsi de réduire la chaleur dégagée par les déchets HA (CSD-V) de 30% après 35 ans et de 60% au bout de 100 ans par rapport à un combustible UNE usé.

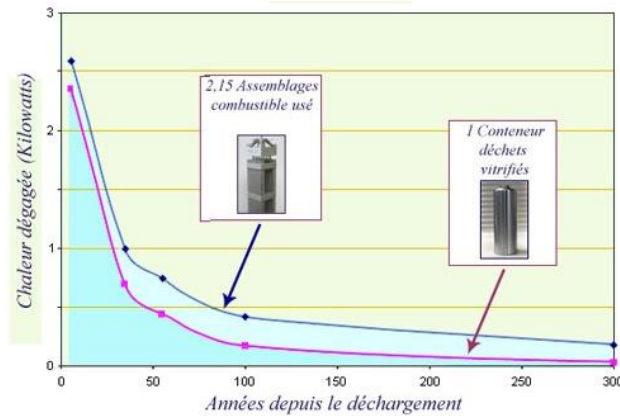


Figure 17 : Décroissance de puissance thermique en fonction du type de déchet, source : rapport de la CNE (2004) cité par Laradioactivité.com⁶³

S'agissant des combustibles MOX irradiés, dont la catégorie (matière valorisable ou déchet) est contestée dans le débat, ces derniers présentent, à leur sortie de réacteur, un niveau d'activité et de radiotoxicité plus important que les combustibles UNE usés (source : Laradioactivité.com⁶⁴), en raison en particulier des teneurs en isotopes du Pu et en actinides mineurs plus élevées dans le MOX usé. La radiotoxicité des MOX usés serait entre 5 à 7 fois supérieure à celles des combustibles UNE usés.

La puissance thermique résiduelle des combustibles MOX usés est également plus importante que celle des combustibles UNE usés. La figure ci-dessous extraite d'un rapport de l'IRSN (2018)⁶⁵ montre ainsi que la décroissance thermique du MOX irradié est plus longue que celle de l'UOX usé. La puissance thermique du MOX irradié serait ainsi d'environ 4 kW par assemblage 5 ans après déchargement contre 1,5 kW pour l'UOX irradié la même période.

⁶² Selon les données d'Orano, on génère 0,75 CSD-V par tML. On génère donc 0,375 CSD-V par assemblage (environ 0,5 tML dans un assemblage de CU), soit environ 1 CSD-V pour 2,15 assemblages d'UNE usé traité. Sources :

<https://pngmdr.debatpublic.fr/images/contributions/contribution-15-orano.pdf> ;

<https://concertation.suretenucleaire.fr/project/questions-reponses-1/collect/depot-et-reponses-aux-questions/proposals/quel-est-la-quantite-de-dechets-issus-de-la-reaction-de-fission-produite-annuellement-par-un-reacteur-de-900mw>

⁶³ https://laradioactivite.com/dechets_radioactifs/chaleurdegagee

⁶⁴ https://laradioactivite.com/energie_nucleaire/combustiblesmixteslemox

⁶⁵ IRSN, (2018). Entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté

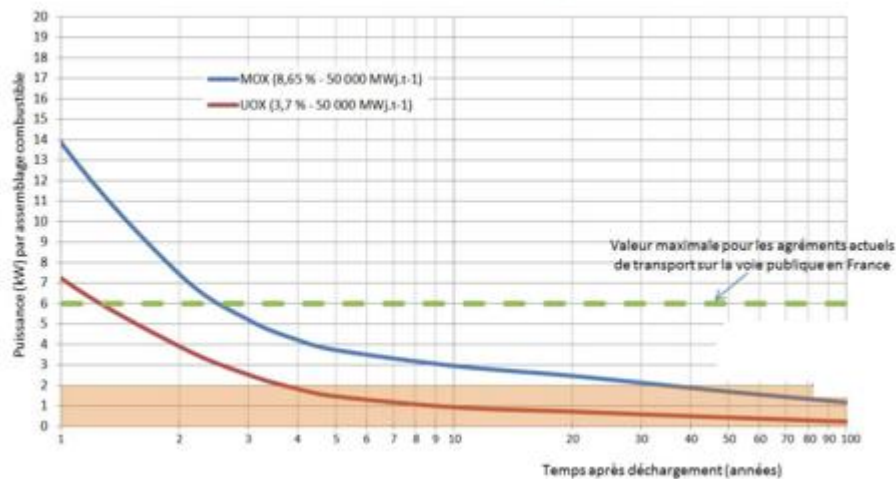


Figure 18 : décroissance de la puissance thermique par type de combustible utilisé, source : IRSN (2018)

Dans le cycle actuel, les combustibles MOX utilisés sont entreposés et considérés comme matière valorisable (tel que défini dans le scénario de cycle URT+Pu en valeur d'option). Cette valorisation interviendrait avec le développement du multi-recyclage en REP (MRREP) puis le déploiement d'une flotte de réacteurs à neutrons rapides (RNR).

Sur le long terme, le déploiement d'une flotte de RNR constitue ainsi, *a priori*, un avantage pour les générations futures. Elle permettra la fermeture complète du cycle avec la valorisation de toutes les matières nucléaires contenues dans les combustibles utilisés et ne nécessitera aucun nouvel apport d'uranium naturel pour produire de l'électricité. Sa mise en œuvre nécessitera cependant le déploiement de ressources techniques, scientifiques et financières conséquentes afin entre autres d'assurer le respect des standards de sûreté nucléaire et de radioprotection.

5.4.3.3. Niveau des technologies et de la compétence industrielle laissées

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

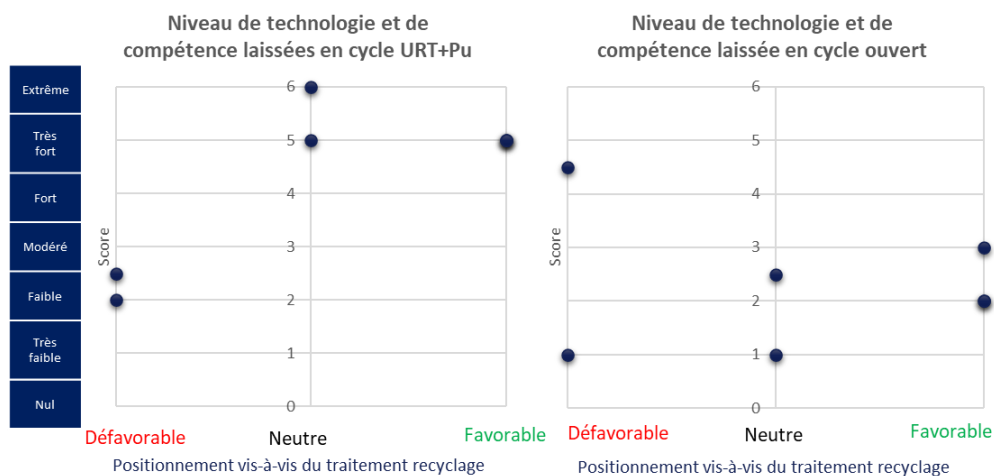


Figure 19 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur l'indicateur technologies et compétence industrielle laissées

Les parties prenantes défavorables n'estiment pas que le mono-recyclage permette aux futures générations de bénéficier de meilleures technologies et compétences. Cependant, leurs opinions divergent sur le niveau laissé en cycle

ouvert : une partie prenante indique qu'un changement de cycle permettrait aux générations futures d'avoir un niveau fort à très fort tandis qu'une autre suggère que le niveau serait similaire, quoique légèrement plus faible, si les générations futures décidaient de changer de cap. Les parties prenantes neutres s'accordent à dire que le niveau est bien plus élevé en cycle URT+Pu, surtout si les RNR sont développés. Les parties prenantes favorables partagent la même vision générale.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur " niveau des technologies et de la compétence industrielle" :
2 visions opposées

Un intérêt pour les générations futures bien plus grand en cycle avec mono-recyclage :

- En poursuivant le mono-recyclage URT+Pu, bien plus de compétences sont laissées aux futures générations pour la gestion des matières et des déchets. (Orano, EDF, CEA, Sauvons le climat)
- Le choix est laissé aux futures générations pour établir leur propre stratégie. En cycle ouvert, elles ne pourront difficilement revenir en arrière et reprendre le mono-recyclage, ou *a fortiori* atteindre la fermeture du cycle car les compétences se perdent très vite, sauf à redévelopper les compétences nécessaires qui sont considérables et longues à acquérir. (EDF, CEA)
- Les futures générations auront les installations pour gérer leurs déchets et matières dans les 2 cycles. Il y aura cependant une différence pour ces générations futures en cas d'atteinte de la fermeture du cycle avec les RNR car elles bénéficieront d'une technologie qui les rendra souverains sur le plan énergétique pour des siècles voire leur permettra d'envisager la transmutation des actinides mineurs. (gestionnaire de déchets étranger)
- Cependant, plus le déploiement des RNR est retardé, plus le risque de perdre les connaissances et ne pas y parvenir augmente. Le développement des AMR permet le maintien de la compétence. (gestionnaire de déchets étranger)
- Le niveau technologique des installations associées au recyclage est fort au moment de leur conception/mise en service. Cependant, compte tenu du temps d'exploitation des installations, elles seront à terme "dépassées", ce qui n'est pas forcément positif. Cela demande aux générations futures de maîtriser des compétences « old school » (car sur des technologies conçues dans les années 1990) qu'on leur laisse. Le maintien de la compétence humaine sera par conséquent déterminant. (IRSN)
- Le stockage est conçu pour que les futures générations n'aient rien à faire. En cycle ouvert, peu de compétences seraient donc léguées, voire aucune. (Orano)

Pas de différence entre les deux cycles ou en faveur du cycle ouvert :

- En regardant les projets passés (Phénix et Superphénix) et en considérant les aspects technico-économiques, l'objectif de fermeture du cycle avec les RNR ne sera probablement jamais atteint. (Greenpeace) Il n'existe aucune étude montrant que les usines de traitement-recyclage vont tenir jusqu'en 2040. De plus, leur reconstruction sera complexe, d'autant plus dans un contexte de perte de compétences humaines. (Greenpeace)
- Les RNR ne seront pas atteints, il n'y a donc pas de différence entre les 2 cycles. (Global Chance)
- La stratégie du mono-recyclage repose sur le développement espéré des technologies permettant la fermeture du cycle mais il existe de bonnes raisons de douter de sa réalisation car rien n'indique aujourd'hui la faisabilité du double saut qualitatif et quantitatif consistant à passer de réactions à l'échelle de cibles dans des réacteurs dédiés à des réactions maîtrisées à l'échelle d'un cœur, puis à un équilibre entre production et élimination à l'échelle d'un parc. (Negawatt)
- En orientant la R&D sur la fermeture du cycle, on ne transmet pas les technologies nécessaires si les futures générations choisissent un cycle ouvert. (Negawatt) Notamment sur l'entreposage à sec pour lequel le niveau d'expertise dont on dispose aujourd'hui en France est très faible. (Greenpeace)

La valeur d'option du multi-recyclage (en REP puis en RNR), permettant une fermeture complète du cycle, se présente comme le sujet le plus évoqué au cours des entretiens sur cet indicateur. Des éléments sur l'état actuel de la recherche et sur les bénéfices théoriques du multi-recyclage en REP puis en RNR sont exposés ci-dessous.

1. Le Multi-Recyclage en REP (MRREP)

Les ressources en uranium naturel devant être abondantes et disponibles à bas prix au moins jusqu'à la deuxième moitié du 21^{ème} siècle, le déploiement de RNR n'apparaît pas utile avant cet horizon⁶⁶. L'Etat et les acteurs de la filière électronucléaire envisagent donc que le passage du cycle actuel (avec mono-recyclage en REP) vers un cycle fermé s'appuyant sur un parc de RNR pourrait se faire (à moyen terme) avec une étape de mise en œuvre d'un multi-recyclage en REP (MRREP) dans le futur parc d'EPR2. Le PNGMDR 2022-2026 prévoit ainsi des scénarios de politique énergétique dimensionnants prospectifs qui intègrent, entre autres, le MRREP (action POL.2). La Programmation Pluriannuelle de l'Energie actuelle sur laquelle repose le PNGMDR actuel demande l'étude du multi-recyclage en REP.

Les études prospectives réalisées sur le sujet, qui portent notamment sur le combustible MOX2 et son procédé de fabrication ou encore le retraitement du MOX, ont fait l'objet d'un examen par la CNE2 qui présente sa position dans un rapport de juin 2023⁶⁷.

Le déploiement du MRREP implique une poursuite du traitement du combustible UOX et une adaptation de l'outil industriel. En effet, la production de combustible MOX2 nécessitera probablement la construction de nouvelles installations permettant de respecter les contraintes de radioprotection et de sûreté nucléaire. Ces exigences seront toutefois prises en compte par conception dans le renouvellement des usines nécessaire en cas de poursuite du recyclage au-delà de 2040.

Si les acteurs de la filière réussissent à relever les enjeux liés à la mise en œuvre industrielle, le MRREP doit permettre de stabiliser l'inventaire de combustibles usés via en particulier le traitement du combustible MOX usé ainsi que l'inventaire de plutonium, augmentant ainsi significativement la part de matières recyclées dans les réacteurs français. La part d'uranium naturel nécessaire à la production d'électricité diminuerait mécaniquement avec une économie supplémentaire par rapport au cycle actuel de l'ordre de 10%, augmentant par conséquent la souveraineté énergétique de la France et réduisant les impacts environnementaux liés aux activités minières. De plus, les développements technologiques nécessaires à la mise en œuvre du MRREP sont précurseurs de ceux nécessaires pour la fermeture du cycle avec les RNR (CEA⁶⁸).

2. Le Multi-Recyclage en RNR

La France a construit et exploité deux réacteurs RNR par le passé : le réacteur Phénix (situé sur le site nucléaire de Marcoule et qui a fonctionné de 1973 à 2009) et le réacteur Superphénix (situé à Creys et qui a fonctionné de 1986 à 1997). Un premier prototype, Rapsodie, avait été conçu à la fin des années 1950 et construit sur le site CEA de Cadarache. Ces réacteurs ont fait de la France un pays à la pointe de ce domaine. Le projet ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration), lancé dans les années 2010, devait conforter le leadership technologique français. Il a néanmoins été arrêté en 2019.

⁶⁶ Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie (2019-2023) (2024-2028).

⁶⁷ Rapport d'Évaluation n°17. Commission Nationale d'Évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs. Juin 2023. https://cne2.fr/telechargements/RAPPORT_CNE2_17_2023.pdf

⁶⁸ <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/dossier-cycle-du-combustible-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=4a1>

La programmation pluriannuelle énergétique (PPE) actuelle indique sur le sujet : "Définir et soutenir un programme de R&D concourant à la fermeture à terme du cycle du combustible nucléaire et mené par les acteurs de la filière. Ce programme reposera à moyen terme sur le multi-recyclage des combustibles dans les réacteurs à eau sous pression de 3ème génération, en maintenant la perspective d'un éventuel déploiement industriel d'un parc de réacteurs à neutrons rapides à l'horizon de la 2ème moitié du 21ème siècle".⁶⁹

La Russie et la Chine sont aujourd'hui en pointe sur la filière RNR et prennent une avance technologique sur les autres pays. La France a ralenti sa R&D mais s'intéresse au développement "d'AMR" dont la modularité pourrait accélérer leur déploiement. Cependant, aucune start-up proposant un concept AMR n'a pour l'instant présenté d'avant-projet sommaire.

S'agissant des bénéfices attendus, le déploiement des RNR permettrait de ne plus dépendre de l'uranium naturel pour l'approvisionnement en combustible des réacteurs (et donc des mines à l'étranger) puisque le combustible de ces réacteurs serait fabriqué à partir des stocks d'uranium appauvri et de plutonium. Cela rendrait la France complètement souveraine sur son approvisionnement en combustibles nucléaires, puisqu'elle pourrait recycler ses matières continuellement, et réduirait à zéro les impacts environnementaux du cycle liés à l'activité des mines et de l'enrichissement. Le tableau ci-dessous, issu de l'inventaire prospectif du CEA, illustre ce point.

Flux annuels de matières	Cycle URT+Pu	Cycle 100% RNR	Cycle ouvert
Consommation Unat t/an	6000 ⁷⁰	0	7500
Production Uapp t /an	5200	-130	6500
Production URTapp t/an	800	0	0
URE t/an	870	0	950
Production nette de Pu t/an	7.2	0	9.9
Américium t/an	1.7	1.1	1.4
HA : m3/TWh	0.26	0.32	1.8
CU t/TWh	180	0	950
MA-VL m3/TWh	0.89	1.37	0.07

Tableau 14 : flux de matières et déchets annuels, source : CEA (2018)⁷¹

La deuxième colonne présente les flux de matières et déchets dans un cycle avec 100% de réacteurs RNR. On observe que ce cycle ne nécessite pas d'uranium naturel, contrairement au cycle ouvert et avec mono-recyclage, ce qui rendrait les futures générations plus souveraines sur le plan énergétique. Par ailleurs les RNR permettent de diminuer le stock d'uranium appauvri, ainsi que d'autres matières valorisables (URE, plutonium...). S'agissant des déchets, le volume de déchets MA-VL serait plus important compte tenu du volume d'éléments de structure plus élevé dans les combustibles usés des RNR que dans ceux des REP. Le volume des déchets HA serait inférieur à celui constaté en cycle ouvert. Enfin, les RNR permettraient de réduire la quantité d'américium par rapport aux deux autres cycles. Par ailleurs, à plus long terme, les RNR pourraient permettre de réduire la quantité de déchets nucléaires à vie longue en incinérant certains actinides mineurs.

Plusieurs facteurs seront déterminants à moyen et long terme pour la transition du cycle actuel vers un cycle fermé s'appuyant sur un parc de RNR : contraintes économiques et techniques, progrès de la recherche, évolution du cours de l'uranium, contexte politique, etc. La France dispose aujourd'hui d'atouts par l'expérience acquise dans le passé, mais

⁶⁹ Stratégie française pour l'énergie et le climat – Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 et 2024-2028 (p.145). <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%201%27e%CC%81nergie.pdf>

⁷⁰ Ces flux, et notamment les flux d'uranium naturel, indiqués en cycle URT+Pu et en cycle ouvert dans cette étude ne sont pas égaux à ceux considérés pour la présente étude et décrits précédemment dans le rapport (cf. chapitre 2 pour les flux d'uranium naturel retenus). Cela s'explique par des différences dans les hypothèses de calculs posées.

⁷¹ Inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs produits par le parc français selon différents scénarios d'évolution. CEA (2018).

le maintien sur le temps long des compétences scientifiques et techniques n'est pas acquis. Le multi-recyclage en REP pourrait permettre d'effectuer la transition.

5.4.4. - Risque de prolifération à partir de plutonium

Le critère de "risque de prolifération à partir de plutonium" reflète le niveau de risque de prolifération par un Etat ou d'une utilisation de plutonium par une organisation ou des individus pour des usages malveillants. Ce niveau de risque dépend à la fois du stock de plutonium présent en France et de son accessibilité dans les différentes matières et différents déchets. Il est mesuré par un unique indicateur qui a la même dénomination que le critère.

Dix parties prenantes de diverses sensibilités ont été interrogées sur ce critère. Pour l'unique indicateur, les scores élicités et les arguments recueillis sont présentés pour éclairer le choix des scores des différentes parties prenantes. Pour rappel, l'échelle de score utilisée est l'échelle de Loekart, variant de 0 (nul) à 6 (extrême). L'indicateur est décroissant, ce qui signifie qu'un score de 0 indique que le risque est nul tandis qu'un score de 6 implique un risque extrême.

Résultats des entretiens

La figure ci-dessous présente les scores des parties prenantes sur cet indicateur en fonction du positionnement identifié de la partie prenante interrogée.

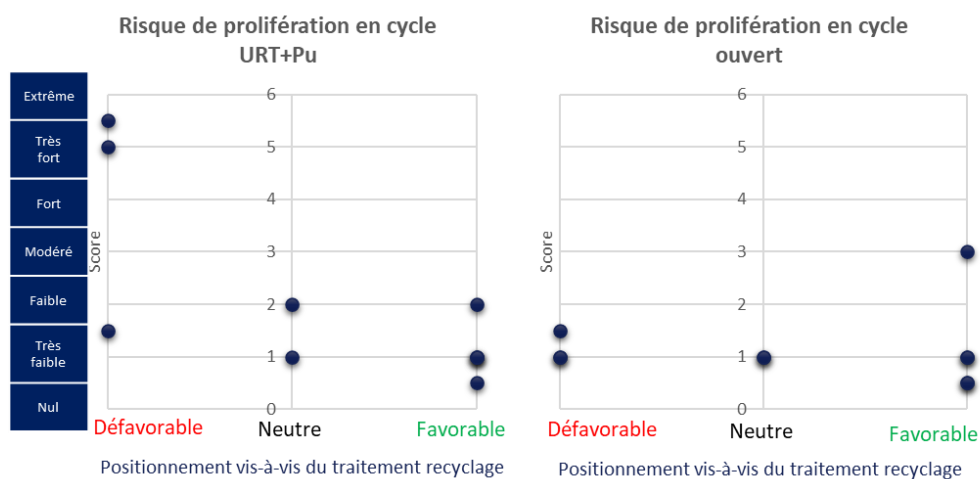


Figure 20 : nuage de points des scores énoncés lors des entretiens sur le critère risque de prolifération à partir de plutonium

L'opinion des parties prenantes défavorables est variable : certains pensent que le risque de prolifération est très faible en cycle ouvert mais très fort en cycle URT+Pu tandis qu'une d'entre elles affirme que le risque est faible à très faible dans les deux scénarios. Un consensus se dégage autour des parties prenantes neutres et favorables qui indiquent que le risque est faible et comparable dans les deux cycles, légèrement en faveur du cycle ouvert. Une exception apparaît cependant pour l'une d'entre elle qui pense que le risque est plus élevé en cycle ouvert.

Les arguments justifiant le choix de ces scores sont exposés dans l'encadré ci-dessous.

Principaux arguments pour les scores de l'indicateur "risque de prolifération" : une majorité d'opinions avec un risque faible dans les deux scénarios, nuancée dans les deux sens

Le risque de prolifération est faible voire très faible dans les deux scénarios :

- Les installations sont très sécurisées en France (l'usine d'Orano à La Hague est notamment hautement gardée) et des dispositifs de protection actifs et passifs importants sont mis en place lors de toutes les étapes dont les transports. (Orano, EDF, gestionnaire de déchets étranger, Global Chance) La France dispose donc d'un savoir-faire conséquent sur la sécurisation des matières sensibles, sans oublier les moyens de la défense qui entrent dans ce dispositif de sécurisation. (EDF)
- Un contrôle et un suivi très strict des matières est réalisé et les réglementations nationales (code de la défense), européenne (Euratom) et internationales (AIEA) sont respectées. (CEA, EDF)
- Il est peu crédible qu'un individu ou une organisation malveillante choisisse d'utiliser cette matière pour en faire une arme. (Sauvons le climat)
- L'équilibre des flux permet de maîtriser et de contrôler le stock de plutonium en le maintenant toujours au plus bas possible. La stratégie industrielle vise à stopper le traitement-recyclage au bon moment avant la fin du parc nucléaire afin que le stock de plutonium séparé soit complètement consommé à la fin de vie du parc. (EDF)
- Dans le cas du cycle ouvert, le plutonium reste dans les CU mais à long terme, le CU aura suffisamment perdu de radioactivité pour faciliter les opérations de récupération de ce plutonium. Entreposer sur une longue durée les CU est donc aussi un risque pour la prolifération. (EDF)
- Le cycle ouvert est moins sensible sur ce sujet, compte tenu de la non-séparation du plutonium des combustibles usés. En effet, compte tenu de l'irradiation associée aux combustibles usés, leur manipulation et les opérations les concernant sont très complexes. (IRSN)

Le risque est très faible en cycle ouvert mais très élevé en cycle avec mono-recyclage :

- Les installations sont très sécurisées en France mais il existe des fragilités sur le segment du transport. Cela pose la question de la pertinence d'avoir placé Melox si loin de l'usine de La Hague. (Greenpeace)
- Le risque est très fort en comparaison du cycle ouvert dans lequel le risque n'existe pas du tout car il faut posséder une compétence très poussée et des installations robustes pour séparer le plutonium du combustible usé (ce n'est pas pour rien que les USA ont défini le « spent fuel standard » comme niveau requis de protection du plutonium contre le risque de prolifération). L'étape de séparation constitue en effet l'étape la plus difficile. (Negawatt)
- Le plutonium extrait n'est pas de bonne qualité mais l'AIEA l'a néanmoins classifié comme produit fissile de catégorie 1. Des militaires ne l'utiliseraient pas car il comporte des isotopes neutrophages mais des civils mal intentionnés pourraient fabriquer une bombe sale. (Global Chance, Greenpeace)
- Le principe d'équilibre des flux n'est pas respecté aujourd'hui, ce qui est contraire à l'esprit du Traité de non-prolifération. (Negawatt)
- Aux horizons de nombreuses décennies nécessaires dans tous les scénarios à la résorption de ce stock, des scénarios d'arrivée au pouvoir de dirigeants choisissant de transférer ce stock à des usages militaires, voire de perte de contrôle institutionnel conduisant à l'appropriation de ce stock par des forces non-étatiques, ne peuvent absolument pas être écartés. (Negawatt)

Le risque est très faible en cycle avec mono-recyclage mais modéré en cycle ouvert :

- Le stock de plutonium séparé accumulé jusqu'en 2040 (lié au cycle actuel) ne serait pas complètement résorbé en cycle ouvert et devrait être géré par les générations futures. (SFEN)
- Pour protéger durablement ce stock de plutonium séparé, une fois la transition en cycle ouvert réalisée, il serait nécessaire de le stocker à Cigéo au cas où les futures générations n'aient pas la capacité de le gérer. Or, le site n'est pas conçu pour accueillir de la poudre de plutonium, signifiant qu'il devrait être stocké en surface à très long terme, ce qui augmente le niveau de risque. (SFEN)

Revue documentaire

La littérature sur le sujet de prolifération à partir de plutonium civil n'est pas abondante car c'est un sujet technique très complexe qui nécessite des connaissances poussées qui sont classifiées.

Le traité de non-prolifération (TNP) a été signé par 187 pays (Charpin, Pellat, Dessus, 2000). Ce traité a pour but de permettre l'acquisition de technologies nucléaires civiles en échange de la promesse de ne pas utiliser ces dernières à des fins militaires. La prolifération se définit comme la dissémination de matières, de techniques et d'un savoir-faire permettant de fabriquer une arme nucléaire (Charpin, Pellat, Dessus, 2000). La SFEN explique que des programmes de surveillance et de lutte contre la prolifération ont été déployés par l'AIEA tel que le projet NUCIFER⁷².

D'après le rapport de Charpin et al. (2000), le mono-recyclage augmente le risque de prolifération car le plutonium est séparé du combustible usé. Certains pays choisissent un mode de stockage direct afin d'éviter ce risque (c'est le cas de la Suède et des USA notamment). Ce risque de prolifération affecte également les générations futures qui devront gérer le stock de plutonium généré aujourd'hui (Charpin, Pellat, Dessus, 2000).

L'usage militaire du plutonium civil n'est cependant pas évident. L'Assemblée nationale explique dans l'un de ses rapports qu'il existe 2 moyens de fabriquer une bombe A : en utilisant de l'uranium enrichi à 90% ou bien 5 à 6 kg de plutonium composé à 90% de l'isotope Pu239. Or, le plutonium séparé du combustible usé est composé à environ 60% de Pu239 et en grande partie de Pu240 et Pu241. Le plutonium séparé manque par conséquent de matière fissile et contient beaucoup d'éléments parasites.

Par ailleurs, la France est soumise à une réglementation stricte à plusieurs niveaux (national, européen, international) afin de lutter contre les risques de prolifération et au niveau national, réduire les risques de pertes, de vol ou détournement de matières nucléaires et protéger les installations nucléaires et les transports contre des actes de malveillance.

Au niveau européen et international, La France soumet ses matières nucléaires aux contrôles de l'AIEA et d'EURATOM. Ces contrôles portent d'une part sur la déclaration et le suivi des mouvements de matières nucléaires (plutonium, uranium, thorium) entre pays, d'autres part sur les déclarations de flux et de stocks de matières détenues au niveau national pour les matières nucléaires qui ne relèvent pas des matières affectées au besoin de la défense nationale (IRSN⁷³).

Au niveau national, la protection et le contrôle des matières nucléaires fait l'objet d'une réglementation spécifique qui relève du Code de la Défense et des textes réglementaires associés. Les matières retenues dans la législation française sont le plutonium, l'uranium, le thorium, le tritium, le deutérium et le lithium 6 (les deux derniers ne sont pas radioactifs). Dans le cadre de cette législation, l'IRSN rappelle les dispositions qui doivent être assurées par les opérateurs et industriels :

- Des mesures de protection physique pour protéger les matières contre la malveillance et le sabotage,
- Des mesures de suivi des matières permettant de connaître à tout moment la localisation et l'usage des matières,
- Des mesures de comptabilité afin de connaître à tout moment les quantités exactes de matières détenues. Pour le plutonium, cette comptabilité est tenue au gramme près,
- Des mesures de confinement pour prévenir les mouvements de matières non autorisés,
- Des mesures de surveillance ayant pour but de garantir l'intégrité du confinement et vérifier l'absence de sortie de matières par des voies illicites.

L'IRSN précisé également que "*l'attribution de l'autorisation pour les matières nucléaires les plus sensibles, telles que le plutonium, nécessite au préalable la réalisation par l'opérateur d'une étude de sécurité visant à évaluer l'efficacité et la*

⁷² Plus de détails sur le projet : <https://www.sfen.org/rgn/nucifer-lutter-proliferation/>

⁷³ <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/controle-matieres-nucleaires>

pertinence du dispositif de protection à l'égard de menaces de référence définies par les pouvoirs publics. Ces menaces prennent en compte aussi bien une menace interne à l'installation (agent malveillant) que la menace d'un groupe d'agresseurs fortement armés cherchant à pénétrer dans l'installation. Les menaces sont réévaluées périodiquement par les services spécialisés de l'Etat pour tenir compte de l'évolution du contexte national et international.

La réglementation impose aussi aux opérateurs la réalisation d'inventaires périodiques de l'ensemble des matières qu'ils détiennent, afin de détecter une discordance éventuelle entre la réalité physique et l'état des stocks comptables. L'autorité peut enfin demander à l'opérateur de réaliser un inventaire en situation de crise afin d'infirmer ou confirmer une information ou une suspicion de vol de matière."

A retenir sur la famille des 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 (cf. matrice de performance en section 6 /).

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 une partie prenante défavorable tandis qu'il performe mieux en cycle avec mono-recyclage pour une partie prenante neutre et bien mieux dans ce même cycle pour les parties prenantes favorables (cf. matrice de performance).

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 séparé reste limité grâce à l'équilibre des flux et fait l'objet de dispositifs de surveillance strictement réglementés, 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).

6 / Résultats et discussion

Cette section présente les résultats de l'analyse multicritère basés sur les analyses exposées ci-avant. Une matrice de performance est en premier lieu décrite afin de synthétiser les résultats de l'étude pour chaque critère, sans attribuer d'importance relative à chacun d'entre eux. Dans un second temps, les résultats sont agrégés au global des critères en posant des hypothèses, notamment sur le poids de ces derniers. Il convient de préciser que cet exercice est généralement réalisé avec les parties prenantes, ce qui n'a pu être fait compte tenu du calendrier de l'étude. Les résultats sont néanmoins discutés au travers de tests de sensibilité et en exposant les limites de l'analyse. Bien que ces résultats soient à prendre avec des précautions en raison de fortes incertitudes et de faiblesses, l'étude permet de tirer des premières conclusions générales sur les enjeux du cycle du combustible et met en évidence les sujets qui devraient être approfondis lors du débat de la prochaine PPE.

6.1. / 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.

Cette matrice, représentée ci-dessous, compare quantitativement ou qualitativement les scénarios. Les résultats sur les critères sociétaux (2^{de} partie du tableau) prennent la forme des scores recueillis au cours des entretiens⁷⁴ et sont présentés par positionnement des parties prenantes (parties prenantes défavorables au traitement-recyclage, parties prenantes neutres, parties prenantes favorables au traitement-recyclage) afin de souligner les dissensus relevés sur ces sujets. A noter qu'afin de comparer et moyenner des indicateurs croissants et décroissants, l'ensemble des scores a été recodé dans un unique sens. Par conséquent et quel que soit le critère sociétal regardé, plus un score est élevé dans un cycle et plus le scénario de ce cycle performe.

⁷⁴ Le score d'un critère pour un type de partie prenante correspond à la moyenne des scores de toutes les parties prenantes du même type sur les scores de l'ensemble des indicateurs du critère. Par exemple, le score du critère souveraineté énergétique est calculé en faisant la moyenne des scores de l'indicateur d'indépendance pour l'approvisionnement en combustible (premier indicateur) avec les scores de l'indicateur de fiabilité de la chaîne de production électronucléaire domestique (second indicateur).

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 >> <i>nécessite une analyse plus poussée</i> 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 15 : matrice de performance de l'analyse multicritère

Cette matrice de performance a pour but de résumer l'information pour les décideurs et éclairer le débat public.

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. Dans l'attente d'une future étude complémentaire, la différence de 1% exposée dans la matrice est retenue. 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. Une mise à jour de l'ACV avec des scénarios prospectifs sur un cycle URT+Pu est cependant attendue au premier trimestre 2024 et viendra compléter les résultats décrits ci-dessus.

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 et qu'il sera nécessaire d'approfondir l'analyse.

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 particulièrement marqué selon ces 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 aux décideurs publics, 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.

6.2. / 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.

La projection d'un critère sur l'échelle de 0 à 100 dépend de si celui-ci a été estimé par fonction de valeur (donnée quantitative comme le nombre d'emploi ou encore une somme en euro) ou par entretien (score de 0 à 6).

Dans le premier cas en l'absence d'une échelle naturelle, le guide méthodologique de Dogson (2009) recommande de construire une échelle de valeur arbitraire ou de considérer la valeur maximale entre les scénarios comme étant égale à 100 pour un critère. Le critère financier est exprimé en différentiel et en pourcentage. Dans la mesure où la différence de coût du cycle au kWh de 1% en faveur du cycle ouvert est retenue (Charpin, Pellat et Dessus, 2000), un score de 100 est considéré sur ce critère dans ce scénario contre un score de 99 en cycle URT+Pu. S'agissant du critère d'externalités économiques, les indicateurs sont convertis sur l'échelle de 100 avant d'être moyennés pour obtenir un score global du critère. L'ensemble des emplois (directs, indirects et induits) à terme sont considérés pour calculer les scores des deux scénarios, c'est-à-dire une fois l'ensemble des piscines d'entreposage construites. Le scénario dont la valeur est la plus élevée se voit attribuer un score de 100 et celui dont la valeur est plus basse prend un score calculé en divisant cette valeur par la valeur de l'autre scénario puis multipliée par 100. Les différences de valeur ajoutée et de retombées fiscales entre les deux cycles sont nulles jusqu'à 2040 puis sont sommées entre 2040 et 2100 avant d'être projetés sur 100. Il est supposé que les recettes économiques des nouvelles piscines d'entreposage (dont la chronique de construction provient d'Orano et EDF) augmentent progressivement à compter de 2040.

Dans le second cas (critères estimés à partir de scores élicités en entretien), le score de 100 représente le meilleur score sur l'échelle proposée en entretien (soit 6/6) et 0 le score le plus bas (soit 0/6). Afin de convertir le score moyen d'un critère, il convient de le multiplier par 100/6. Cette méthode de projection est utilisée pour tous les critères sociétaux et le critère "impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires" afin d'homogénéiser les comparaisons et suit la recommandation du guide d'analyse multicritère de Dogson (2009).

Pour ce dernier critère, il n'a cependant pas été possible d'estimer un score en cycle ouvert compte tenu d'incertitudes trop importantes sur le territoire hypothétique au milieu de la France. En se référant à la revue documentaire réalisée (notamment en prenant les exemples de projet de piscine d'EDF et du CLAB en Suède), il est supposé que l'impact sur les riverains est identique en cycle ouvert (impact modéré avec globalement peu de nuisances mais un impact potentiel sur le paysage et l'image du territoire). Cette hypothèse fait par ailleurs l'objet d'un test de sensibilité en section 6.3. /

Chaque critère est converti sur 100 dans les deux scénarios en moyennant les scores sur 100 de tous ses indicateurs, ce qui sous-entend que chaque indicateur possède la même importance au sein des critères. Un second niveau d'agrégation est ensuite effectué afin d'obtenir des scores globaux par famille de critères. Pour cette agrégation, il est supposé que l'importance de chaque critère au sein d'une famille est identique. Le score agrégé d'une famille de critère est donc calculé comme étant la moyenne des critères de cette famille. Enfin, un score final pour chaque scénario est calculé en considérant des poids équitables entre les familles de critères. L'exercice de pondération peut en principe être réalisé avec les parties prenantes. Compte tenu du calendrier de l'étude, cela n'a pas été possible et 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. A noter que des scores agrégés sont donnés pour chaque type de parties prenantes (neutre, favorable et défavorable au traitement-recyclage) afin de faire apparaître les dissensus.

Les résultats de la conversion en un score sur 100 sont présentés dans le tableau ci-dessous :

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 16 : 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	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert
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 17 : 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. La sensibilité des résultats à certaines d'entre elles est testée dans la section suivante, complétée par un descriptif des limites de l'analyse.

6.3. / Sensibilité et principales limites des résultats

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.

Chaque test de sensibilité est présenté en détail en annexe (cf. annexe 9.2. /). Ces tests visent à approfondir l'analyse et étudient les scores désagrégés et agrégés au global des parties prenantes (ce qui n'a pas été fait dans l'analyse centrale). 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	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. 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.
Pondération égale entre tous les critères	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	Contrairement à l'analyse centrale, le cycle ouvert domine en ne considérant que les préférences des parties prenantes défavorables au traitement-recyclage.

	combinaisons possibles de poids entre les critères.	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
Différence de coûts du cycle plus importante entre les 2 scénarios	Ce test cherche la différence en pourcentage du coût financier entre les deux cycles susceptible de changer la conclusion de l'étude	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
Absence d'impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert	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	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
Absence d'impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert + pondération inégale entre les familles de critères	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. Les pondérations entre famille de critères ne sont pas supposées comme étant égale d'une famille à une autre	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%. Dans 99,30% des combinaisons de poids possibles entre les familles de critères, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert

Tableau 18 : 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.

7 / Conclusions et perspectives

L'étude s'inscrit dans le cadre de l'action POL.1 du PNGMDR 2022-2026 et vise à éclairer le prochain débat public de la PPE sur les enjeux socio-économiques, environnementaux et territoriaux du cycle du combustible en France. Pionnière dans l'analyse de l'ensemble des enjeux du cycle en France, elle met en évidence le potentiel de l'analyse multicritère pour évaluer une diversité importante de sujets complexes. L'approche méthodologique de l'AMC a permis d'aborder une palette de critères complexes à mesurer compte tenu de leur nature, de l'absence de données ou encore des désaccords dont ils font l'objet. Cette méthodologie est sujette à un certain nombre de limites mais des perspectives existent pour les réduire et approfondir le niveau d'analyse.

Les résultats désagrégés de l'étude 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. Ce dernier aspect mériterait toutefois d'être plus investigué, notamment en cycle ouvert. 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.

Les résultats de l'étude pourraient être enrichis avec des données complémentaires qui n'ont pu être mobilisées dans le temps imparti de l'étude et par un élargissement de l'échantillon d'acteurs interrogés. Néanmoins, le biais introduit par la taille réduite de l'échantillon dans cette étude est atténué par le classement des résultats par type de parties prenantes.

Les analyses et conclusions de l'étude permettront d'alimenter le débat et ouvrent la voie à de futures études pour approfondir l'évaluation des enjeux du cycle.

De telles études peuvent par exemple miser sur une concertation plus poussée des parties prenantes pour définir le choix des scénarios et des critères d'analyse. Par ailleurs, l'analyse des critères sur la base d'entretiens pourra reposer sur un échantillon plus grand de répondants et inclure l'ensemble des parties prenantes (DGEC, Andra, CNE2...). Enfin, les résultats d'une analyse multicritère pourront être complétés par un exercice de pondération, tout en tenant compte des biais stratégiques, et par des analyses plus poussées telle que l'application de la méthode PROMETHEE (méthode de sur-classement).

8 / Bibliographie

ANDRA, (2023). Rapport financier 2022.

ANDRA, (2022). Dossier d'autorisation de création de l'installation nucléaire de base (INB) Cigéo.

ANDRA, (2021). Projet nouveau nucléaire français. Evaluation de l'impact sur les filières de gestion des déchets.

ASN. Le contrôle de la sûreté du cycle du combustible nucléaire : le rôle et les actions de l'ASN.

Butler, G.; Hesketh, K. Choosing the Right Nuclear Power Systems. In Nuclear Future; Cornell University Press: Ithaca, NY, USA, 2017; pp. 50–56.

BVA, (2023). Etude locale sur la perception du site Orano Melox.

BVA, (2023). Etude locale sur la perception du site Orano la Hague.

Charpin, Pellat, Dessus, (2000). Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire.

CEA, (2023). Action POL.1 du PNGMDR 2022-2026. Hypothèses et premiers résultats volet "environnement".

CEA, (2015). Avancées des recherches sur la séparation-transmutation le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides.

CEA, (2022). Rapport financier.

CEA, (2018). Inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs produits par le parc français selon différents scénarios d'évolution.

J.S. Dogson, (2009). Multi-criteria analysis: a manual. *Communities and Local Government: London*.

CNDP, (2021). Clarification des controverses techniques.

CNE², (2022). Des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs.

Cour des comptes, (2019). L'aval du cycle du combustible nucléaire.

Deslongchamps, Caron, Tremblay, (2021). Revue de littérature - l'eutrophisation en milieu marin.

EASAC. Management of Spent Nuclear Fuel and Its Waste; EASAC (European Academies Science Advisory Council):Halle, Germany, 2014.

EDF, (2022). Projet de construction d'une installation d'entreposage sous eau de combustibles usés à La Hague. *Dossier de concertation*. Concertation préalable du 22 novembre 2021 au 18 février 2022.

EDF, (2022). Action POL.3 du PNGMDR 2022-2026. Analyse de la résilience de la politique de gestion des matières et des déchets radioactifs.

EDF, (2022). R&D oser le futur.

EDF, (2017). The French nuclear fuel cycle. *Sino-French seminar nuclear fuel cycle scenario studies*.

Gassilloud et Piednoir, (2021). L'énergie nucléaire du futur et les conséquences de l'abandon du projet de réacteur nucléaire de 4e génération "ASTRID".

GNRC, (2002). Evaluation des risques pour la santé humaine associés aux rejets chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin.

HTCSIN, (2018). Présentation du "cycle du combustible" français en 2018.

Humbert, De Schryver, Bengoa, Margini, Jolliet, (2012). Impact 2002+ User guide.

IRSN, (2018). Entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté.

IRSN, (2022). Cycle du combustible nucléaire. Impact des scénarios de mix énergétique et de la production actuelle de l'usine de Mélox.

IRSN, (2022). Guide d'application d'une méthodologie d'analyse multi-acteurs et multicritère d'aide à la décision (AMAMC).

IRSN, (2019). Etablissement Orano Cycle de La Hague. Réexamen de sûreté STE3 (INB numéro 118). Etude d'impact sanitaire et environnemental de l'établissement de La Hague.

IRSN, (2008). Les études épidémiologiques des leucémies autour des installations nucléaires chez l'enfant et le jeune adulte : revue critique.

Ko, W., II; Gao, F. Economic Analysis of Different Nuclear Fuel Cycle Options. *Sci. Technol. Nucl. Install.* 2012, 2012, 293467.

Kryzia et Gwalik, (2016). Forecasting the price of uranium based on the costs of uranium deposits exploitation. *Mineral resources management*. Volume 32. p93-110.

Ministère de la transition écologique et solidaire (2020). Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie (2019-2023) (2024-2028).

Négawatt, (2022). Quels enjeux éthiques et politiques associés au débat sur de nouveaux EPR?

NEA. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management; NEA (Nuclear Energy Agency OECD): Paris, France, 2006.

Orano, EDF, (2022). Action POL.1 du PNGMDR 2022-2026. Enjeux territoriaux, sociaux et économiques liés au cycle.

Orano, (2023). Bilan 2022 et perspective 2023 Orano la Hague.

Orano, (2023). Bilan d'activité 2022 de l'usine Mélox.

Orano, (2022). Rapport annuel de surveillance de l'environnement Orano la Hague 2022.

Orano, (2023). Rapport d'information du site Orano la Hague 2022.

Orano, (2023). Rapport d'information du site Orano Mélox 2022.

Orano, (2022). Rapport d'information du site Orano la Hague 2021.

Orano, (2023). Rapport d'information du site Orano Mélox 2022.

PwC, (2011). Le poids socio-économique de l'électronucléaire en France.

SFEN, (2017). Les coûts de production du parc nucléaire français.

SFEN, (2021). Le nucléaire au service de la réussite des territoires.

SFEN, (2022). Combien coûte le nucléaire ? économie du nucléaire dans le système électrique.

SFEN, (2021). Un pilier de la souveraineté énergétique.

SKB, (2011). Environmental impact statement of Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel in Sweden.

Taylor, Bodel, Butler, (2022). A review of environmental and economic implications of closing the nuclear fuel cycle - part two; economic impacts. *Energies* 2022, 15, 2472.

Taylor, Bodel, Butler, (2022). A review of environmental and economic implications of closing the nuclear fuel cycle - part one; Wastes and Environmental impacts. *Energies* 2022, 15(3), 1433.

WISE-Paris, (2019). La distinction matières/déchets. Implication des choix de quantification.

WISE-Paris, (2007). Volumes de déchets en stockage géologique : une comparaison des options stockage direct et retraitement.

9 / Annexes

9.1. / Analyse complémentaire des nuages de points des critères sociétaux

Les analyses complémentaires ci-dessous visent à étudier les scores des critères sociétaux élicités en entretien en regardant de près les résultats au global de l'ensemble des parties prenantes. Cette analyse doit cependant être observée avec beaucoup de précautions car ses résultats dépendent significativement de l'échantillon interrogé. En effet, varier le nombre de parties prenantes et le nombre de parties prenantes par type (favorables, défavorables, neutres) peut avoir une incidence forte sur les résultats. Pour cette raison, cette analyse complémentaire n'est pas prise en compte dans le rapport de l'étude mais figure, à titre d'information, dans la présente annexe.

Souveraineté énergétique

Indicateur		Cycle URT+Pu – cycle ouvert
Indépendance en approvisionnement	Médiane	0,50
	Moyenne	0,81
Fiabilité de la chaîne domestique - niveau de risque de rupture	Médiane	1,50
	Moyenne	1,00

Tableau 19 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "souveraineté énergétique de la France"

Le tableau résume, pour le critère souveraineté énergétique, la différence des scores médians et moyens de chaque indicateur. La soustraction pour la moyenne se calcule par exemple comme suit :
[moyenne des scores du cycle URT+Pu – moyenne des scores du cycle ouvert]

Le premier indicateur est croissant tandis que le second est décroissant (un risque de rupture plus élevé rend un cycle moins performant car moins fiable).

La différence de médiane permet d'avancer que plus de 50% des parties prenantes interrogées jugent que le cycle URT+Pu améliore l'indépendance de la France sur l'approvisionnement de combustibles. La différence est cependant peu marquée (car proche de 0) et seules les parties prenantes favorables au cycle URT+Pu jugent qu'il y a une différence significative entre les deux scénarios. Les écarts-types des scores montrent que les opinions sont plus dispersées sur la question de l'indépendance de la France en approvisionnement de combustibles en cycle URT+Pu qu'en cycle ouvert, ce qui est aligné avec la diversité des arguments avancés.

S'agissant du second indicateur, plus de 50% des parties prenantes jugent que le cycle ouvert présente un risque de rupture plus faible dans la chaîne de production qu'en cycle URT+Pu (une médiane positive signifie en effet que la médiane du cycle ouvert est plus basse, ce qui se traduit par un niveau de risque moins élevé). Cette différence est relativement marquée (médiane bien supérieure à 0) et s'explique par un consensus assez présent entre les parties prenantes défavorables et neutres. Ainsi, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu sur cet indicateur, au global des parties prenantes. L'écart-type des scores donnés en cycle URT+Pu est par ailleurs plus grand que celui des scores en cycle ouvert, reflétant une plus grande diversité d'opinions dans le premier scénario.

Leadership scientifique et industriel

Indicateur		Cycle URT+Pu – cycle ouvert
Compétences humaines	Médiane	2,00
	Moyenne	1,67
Niveau R&D	Médiane	2,50
	Moyenne	1,50
Rayonnement de la France	Médiane	2,50
	Moyenne	2,16

Tableau 20 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "leadership scientifique et industriel de la France"

Le tableau ci-dessus résume, pour le critère leadership, la différence des scores médians et moyens de chaque indicateur. Tous les indicateurs étant croissants, une médiane positive signifie que 50% des parties prenantes estiment que le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert sur ces indicateurs.

On observe que les médianes sont bien supérieures à 0, ce qui indique que le cycle URT+Pu domine significativement le cycle ouvert pour plus de la moitié des interrogés. Cependant, une seule partie prenante défavorable au traitement-recyclage a donné son opinion sur ce critère.

Intérêt porté aux générations futures

Indicateur		Cycle URT+Pu – cycle ouvert
Volume déchets	Médiane	-2,00
	Moyenne	-0,86
Dangerosité déchets	Médiane	0,00
	Moyenne	-0,43
Technologies et compétences	Médiane	3,00
	Moyenne	2,35

Tableau 21 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "intérêt porté aux futures générations"

Le tableau ci-dessus résume, pour le critère intérêt porté aux générations futures, la différence des scores médians et moyens de chaque indicateur.

Les deux premiers indicateurs sont décroissants, c'est-à-dire qu'un niveau élevé pour ceux-ci n'est pas souhaitable pour un cycle. Le dernier indicateur est croissant puisqu'un niveau élevé de technologies et de compétences laissé aux générations futures est jugé comme positif.

Plus de 50% des parties prenantes estiment que le cycle URT+Pu améliore le bien-être des futures générations sur les premier et troisième indicateurs (moins de déchets et meilleures technologies et compétences). La dominance du cycle URT+Pu est stricte car les médianes sont éloignées de 0. La médiane du second indicateur est égale à 0 signifiant qu'exactement 50% des parties prenantes jugent que les déchets laissés en cycle URT+Pu sont plus dangereux qu'en cycle ouvert et que l'autre moitié estime l'inverse.

L'écart-type des scores en cycle URT+Pu est toujours plus grand que celui des scores en cycle ouvert, reflétant une plus grande hétérogénéité des réponses pour le premier scénario.

A noter que certains acteurs ne se sont pas prononcés sur le score de certains indicateurs du critère.

Des désaccords importants existent sur les déchets laissés aux futures générations. Les différences d'opinion sont principalement expliquées par des hypothèses de calcul différentes sur : le type de déchets inclus, les données d'emprises utilisées, l'atteinte ou non des RNR. Les données objectives aident à comprendre mieux ce qui se passerait dans un cas comme dans l'autre, mais ces données ont une part de subjectivité également puisqu'elles reposent sur des hypothèses de calcul qui impactent les résultats finaux directement. Une convergence sur les hypothèses de calcul à retenir pourrait faire avancer la question des déchets laissés aux futures générations.

Risque de prolifération à partir de plutonium

Indicateur		Cycle URT+Pu – cycle ouvert
Risque de prolifération	Médiane	0,25
	Moyenne	0,85

Tableau 22 : statistiques descriptives de la différence de scores du critère "risque de prolifération"

Le tableau ci-dessus résume, pour le critère risque de prolifération, la différence des scores médians et moyens de chaque indicateur.

L'indicateur est décroissant, ce qui signifie qu'un niveau plus élevé rend un cycle moins performant.

On observe à partir de la médiane que plus de 50% des parties prenantes estiment que le cycle URT+Pu augmente le risque de prolifération.

L'écart-type des scores en cycle URT+Pu est toujours plus grand que celui des scores en cycle ouvert (1.67 en cycle URT+Pu contre 0.68 en cycle ouvert), indiquant une plus grande hétérogénéité des réponses pour le premier scénario.

Certaines parties prenantes défavorables ont attribué un score situé entre très fort et extrême en cycle URT+Pu, ce qui tire la moyenne vers le haut et augmente l'écart-type du scénario. Les autres observations (dont une association défavorable) ont toutes indiqué un score faible ou inférieur. Une tendance semble se dégager autour du fait que le risque de prolifération est plus élevé en cycle URT+Pu mais la différence d'ampleur ne fait pas consensus.

9.2. / Tests de sensibilité

L'objectif des tests de sensibilités est de tester l'incertitude paramètre par paramètre et son impact sur les résultats finaux. En premier lieu, les hypothèses de l'analyse principale sont reprises et un paramètre est modifié pour chaque test. Dans le dernier test, plusieurs paramètres seront modifiés simultanément.

Tests sur les poids des critères et familles de critères

Dans ce premier test, l'hypothèse de pondération égale entre famille de critères est modifiée. Les résultats de l'analyse principale sont repris ci-dessous pour les parties prenantes défavorables uniquement car seul le cas dans lequel leurs opinions sont retenues peut faire varier la conclusion des résultats.

Positionnement des parties prenantes	Défavorable au traitement-recyclage	
	URT+Pu	Ouvert
Financier	99,00	100,00
Territorial	67,84	24,62
Sociétal	34,95	57,06
Score global	67,26	60,56

Tableau 23 : résultats de l'analyse principale pour les opposants au cycle URT+Pu

Le premier test consiste à calculer la valeur seuil du poids accordé à la famille de critères sociétaux, tel que le score agrégé du cycle URT+Pu en considérant les préférences des opposants soit inférieur à celui du cycle ouvert. Le calcul suivant est effectué :

$$w_1 * (99 - 100) + w_2 * (67,84 - 24,62) + w_3 * (34,95 - 57,06) \leq 0$$

Sous la contrainte :

$$\begin{cases} w_1 + w_2 + w_3 = 1 \\ w_1 = w_2 \end{cases}$$

Avec w_1, w_2 et w_3 les poids associés aux critères financiers, territoriaux et sociétaux respectivement. Le poids de la famille de critères financiers est supposé égal à celui de la famille de critères territoriaux pour simplifier la résolution de l'inéquation.

Résoudre cette inéquation nous renseigne que pour n'importe quel poids supérieur à 50,00% environ pour la famille de critères sociétaux, le score global du cycle ouvert en prenant en compte les préférences des opposants est supérieur à celui du cycle URT+Pu.

Dans un second test, la valeur seuil du poids associé au critère financier est calculée, tel que le score agrégé au global de toutes les parties prenantes et familles de critères du cycle URT+Pu soit inférieur à celui du cycle ouvert. Les résultats de l'analyse principale sont rappelés 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	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert
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 24 : résultats de l'analyse principale

Le calcul suivant est effectué :

$$w_1 * (99 - 100) + w_2 * (67,84 - 24,62) + w_3 * (5,86^{75}) \leq 0$$

Sous la contrainte :

$$\begin{cases} w_1 + w_2 + w_3 = 1 \\ w_3 = w_2 \end{cases}$$

Avec w_1, w_2 et w_3 les poids associés aux critères financiers, territoriaux et sociétaux respectivement. Le poids de la famille de critères sociétaux est supposé égal au poids de la famille de critères territoriaux pour simplifier la résolution de l'inéquation. Cette hypothèse est relâchée dans la simulation réalisée plus bas.

Résoudre cette inéquation nous renseigne que pour n'importe quel poids supérieur à 91,35% environ pour la famille de critères financiers, le score du cycle ouvert agrégé au global des familles de critères et prenant en compte toutes les préférences des parties prenantes est supérieur à celui du cycle URT+Pu.

Dans un troisième test de sensibilité, des simulations de Monte Carlo sont effectuées en reprenant les résultats de l'analyse principale. Des tirages sont réalisés sur la valeur des poids des 3 familles de critères pour calculer la distribution de la différence des scores agrégés par critère et prenant en compte toutes les préférences des parties prenantes entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert. L'histogramme suivant montre le résultat de 1 000 000 de simulations de combinaisons des poids des 3 familles de critères. La différence de score se fait toujours comme suit : (score agrégé du cycle URT+Pu) - (score agrégé du cycle ouvert). Les scores agrégés sont agrégés au global des parties prenantes et dépendent des poids des familles de critères. La simulation effectuée formellement avec le calcul suivant :

$$w_1 * (99 - 100) + w_2 * (67,84 - 24,62) + w_3 * (5,86)$$

Sous la contrainte :

$$\{w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

Les simulations montrent la distribution sur 1 000 000 de combinaisons de sommes de w_1, w_2 et w_3 égale à 1. En ordonnée de l'histogramme figure la fréquence (i.e. dans ce cas le nombre de fois qu'une valeur est comptée) et en abscisse la différence de score agrégé totale entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert.

⁷⁵ Moyenne des scores des critères sociétaux entre les 3 types de parties prenantes. Le calcul suivant est effectué : (score moyen des critères sociétaux pour les opposants + score moyen des critères sociétaux pour les parties prenantes neutres + score moyen des critères sociétaux pour les favorables)/3. Le nombre d'observation par type de partie prenantes est donc moins enclin à distordre les résultats.

Histogram of Différence de scores (URT+Pu-ouvert)

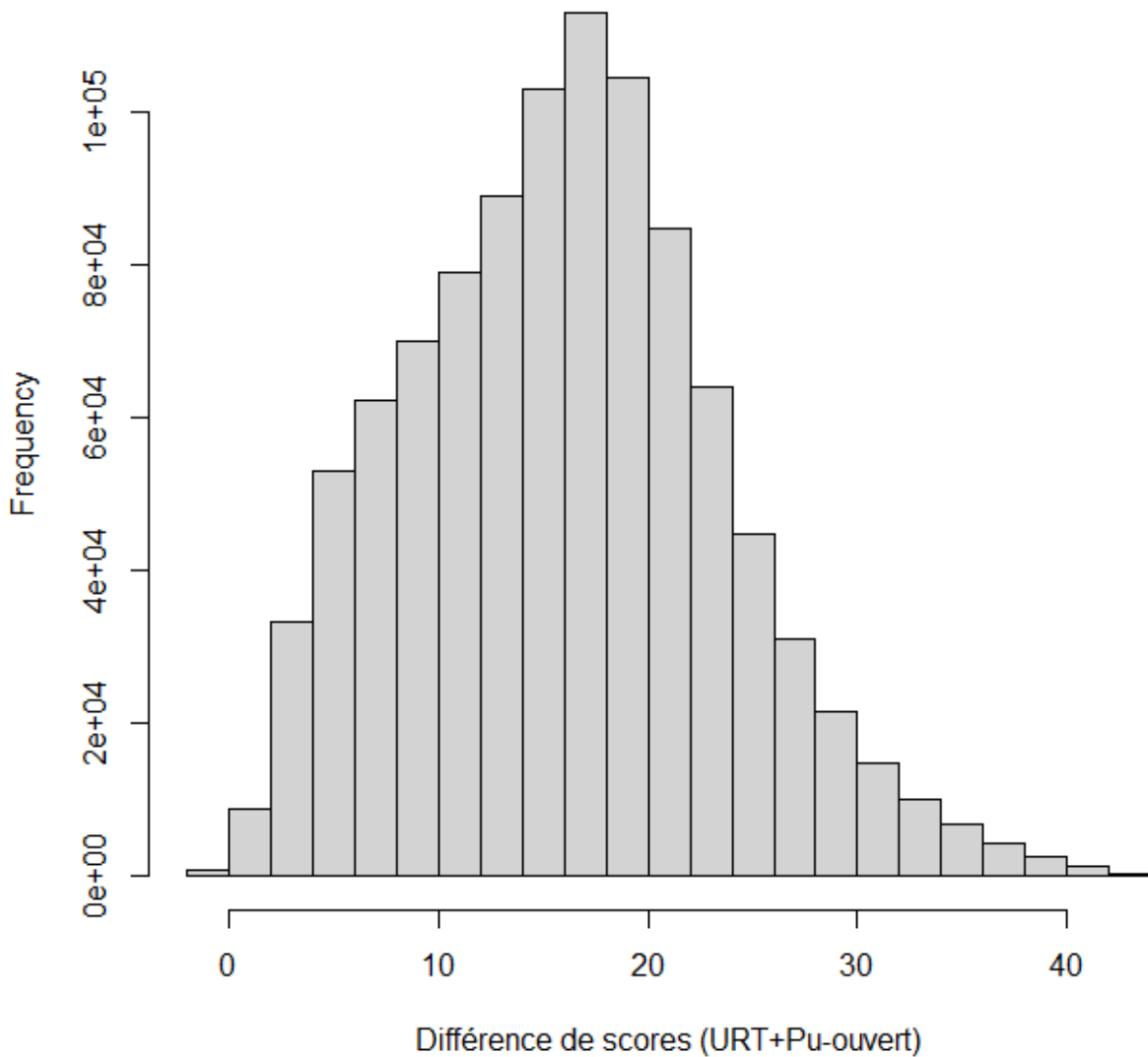


Figure 21 : distribution de la différence de score entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert en fonction des poids des familles de critères

Dans 99,93% des combinaisons possibles des poids de famille de critères, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert.

Dans un quatrième test de sensibilité, la variation de poids sur les critères (et non plus sur les familles de critères) est analysée. Le but est de tester l'impact du nombre de critère par famille de critères sur le résultat final en supposant ici que le poids attribué à l'ensemble des critères est identique. Les résultats de l'analyse centrale par critère sont rappelés ci-dessous.

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	55,56	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 25 : résultats par critère de l'analyse principale

Pour estimer le résultat agrégé final par partie prenante avec un poids identique des critères, une moyenne est calculée entre les scores des critères financiers, d'externalités économiques, de souveraineté, de leadership, de futures générations et de prolifération.

En prenant uniquement les préférences des parties prenantes opposées au cycle URT+Pu pour les critères sociétaux, les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

Critère/cycle	URT+Pu	Ouvert
Critère financier	99	100
Critère externalités économiques	67,84	24,62
Critère souveraineté	29,17	41,67
Critère leadership	55,56	69,44
Critère futures générations	21,76	36,57
Critère prolifération	33,33	80,56
Score agrégé	51,11	58,64

Tableau 26 : Scores agrégés pour les opposants avec une pondération par critère

Pondérer par critère augmente l'importance relative des critères sociétaux (car une pondération par famille implique que 4 critères sociétaux ne forment plus qu'un score d'une famille tandis que seulement 1 critère territorial forme directement le score de sa famille). En appliquant cette méthode de pondération, et en prenant en compte les préférences des opposants, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu.

En prenant en compte l'opinion de toutes les parties prenantes, le score agrégé du cycle URT+Pu vaut 68,86 et celui du cycle ouvert 57,92, ce qui signifie qu'au global de toutes les parties prenantes, une pondération équitable entre les critères n'a pas d'influence sur la domination du cycle URT+Pu.

Un cinquième test vient compléter le précédent et vise à simuler des scores agrégés au global des parties prenantes lorsque l'on pondère par critère. Formellement le calcul suivant est effectué.

$$w_1 * (99 - 100) + w_2 * (67,84 - 24,62) + w_3 * (48,38 - 53,13^{76}) + w_4 * (72,45 - 53,86^{77}) + w_5 * (62,81 - 35,26^{78}) + w_6 * (63,33 - 81,30^{79})$$

Sous la contrainte :

$$\{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1$$

w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 et w_6 sont respectivement les poids associés aux critères financiers, externalités économiques, souveraineté, leadership, futures générations et prolifération.

Les simulations montrent la distribution sur 1 000 000 de combinaisons de sommes de w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 et w_6 égales à 1. Les résultats des simulations sont montrés dans la figure ci-dessous. En ordonnée de l'histogramme figure la fréquence (i.e. dans ce cas le nombre de fois qu'une valeur est comptée) et en abscisse la différence de score agrégé totale entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert.

⁷⁶ Score agrégé au global des parties prenantes pour le critère souveraineté

⁷⁷ Score agrégé au global des parties prenantes pour le critère leadership

⁷⁸ Score agrégé au global des parties prenantes pour le critère futures générations

⁷⁹ Score agrégé au global des parties prenantes pour le critère prolifération

Histogram of Différence de scores (URT+Pu-ouvert)

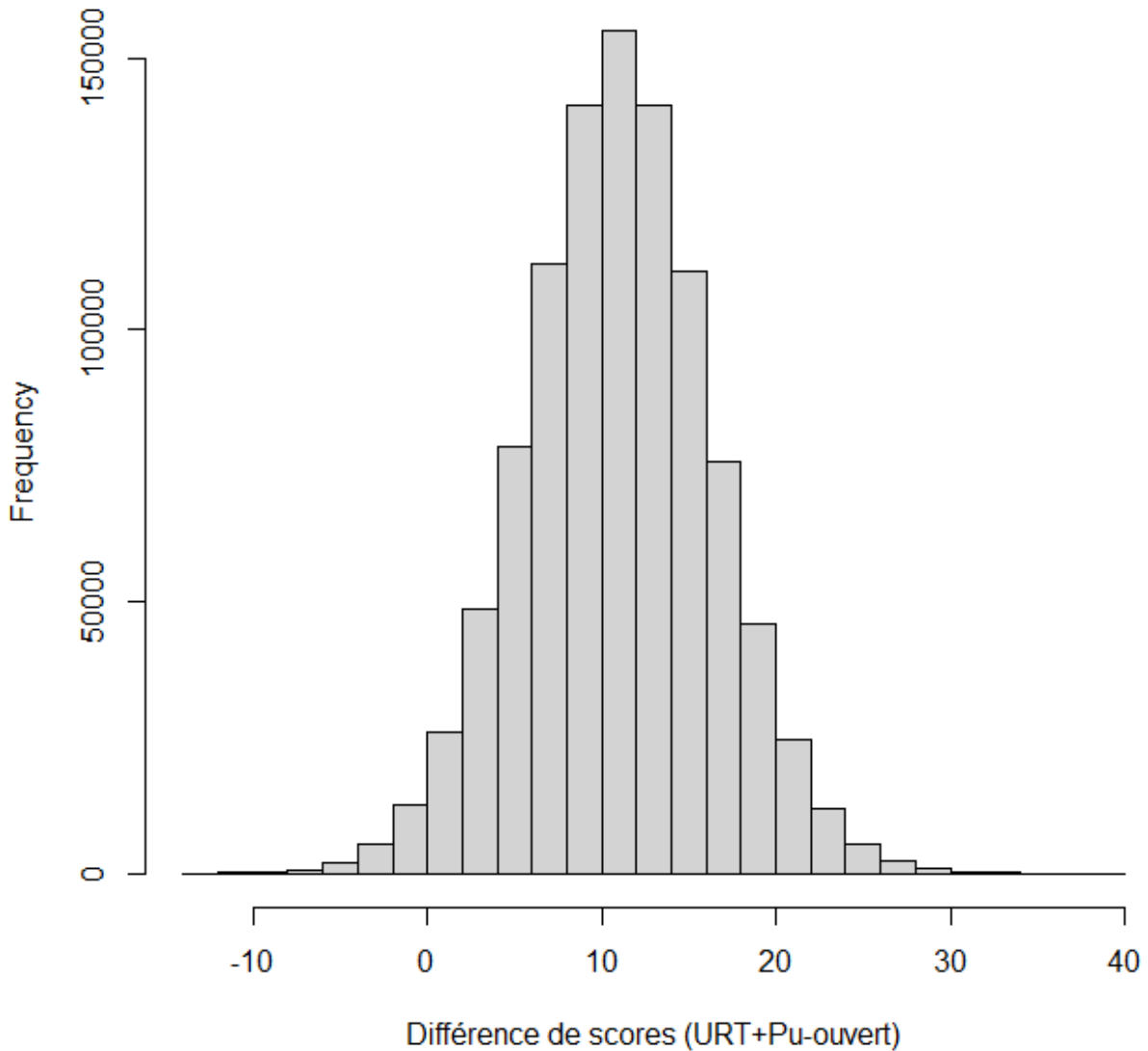


Figure 22 : distribution de la différence de score entre le cycle URT+Pu et le cycle ouvert en fonction des poids des critères

On observe ainsi que l'application d'une pondération par critère sur les résultats principaux de l'analyse permet de conclure que dans 97,97% des combinaisons de poids possible entre les critères, le score du cycle URT+Pu domine celui du cycle ouvert.

Test sur la différence des coûts du cycle entre les 2 scénarios

La valeur seuil du score de la famille de critère financier en cycle URT+Pu, telle que le score global du cycle ouvert domine, est exploré. Pour effectuer ce test, l'hypothèse que les poids des familles de critères sont égaux est posée. Le calcul suivant est réalisé :

$$\frac{1}{3}(x - 100) + \frac{1}{3}(43,22) + \frac{1}{3}(5,86) \leq 0$$

Résoudre cette inéquation nous renseigne que pour n'importe quel score du cycle URT+Pu sur le critère financier inférieur à 50,92, le score du cycle ouvert agrégé au global des familles de critères, et prenant en compte toutes les préférences des parties prenantes, est supérieur à celui du cycle URT+Pu (cycle ouvert domine cycle URT).

En d'autres termes, cela signifie que dès lors que le coût du cycle URT+Pu est approximativement deux fois supérieur à celui du cycle ouvert et que l'on considère une pondération équitable entre familles de critères, le cycle ouvert domine au global le cycle URT+Pu.

Test sur les impacts sociaux sur le quotidien des riverains et des territoires en cycle ouvert en supposant une absence d'impacts

Dans ce septième test de sensibilité, les mêmes hypothèses que celles de l'analyse principale sont reprises. Cependant, l'impact sur le quotidien des riverains et des territoires n'avait pas pu être quantifié. Afin de tester la sensibilité de ce paramètre, l'hypothèse suivante est posée : le cycle ouvert performe parfaitement sur ce critère, ce qui signifie l'absence d'impacts sociaux sur les riverains et territoires. Les résultats du test sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Scénario	Cycle URT+Pu		Cycle ouvert			
Financier	99,00		100,00			
Coûts du cycle	99,00		100,00			
Territorial	66,33		62,31			
Externalités économiques	67,84		24,62			
Impacts riverains et territoires	64,83		100,00			
Positionnement des parties prenantes	Défavorable au traitement-recyclage		Neutre		Favorable au traitement-recyclage	
	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 27 : matrice des scores (analyse centrale)

Les scores sont ensuite agrégés au niveau des familles de critères 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	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert
Financier	99,00	100,00	99,00	100,00	99,00	100,00
Territorial	66,33	62,31	66,33	62,31	66,33	62,31
Sociétal	34,95	57,06	71,53	54,86	78,75	55,73
Score global	66,76	73,12	78,95	72,39	81,36	72,68

Tableau 28 : scores agrégés par famille de critères et par type de partie prenante

En prenant en compte les préférences des parties prenantes opposées sur les critères sociétaux, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu.

Test sur plusieurs des paramètres ci-dessus combinés

Dans ce huitième test de sensibilité, l'hypothèse d'absence d'impacts sociaux sur les riverains et territoires en cycle ouvert est reprise. Par ailleurs, l'importance des poids associés aux familles de critères est analysée.

Premièrement, le test vise à déterminer un seuil de poids à attribuer à la famille de critères financiers pour que le cycle ouvert (au global des parties prenantes) domine le URT+Pu.

Le calcul suivant est posé :

$$w_1 * (99 - 100) + w_2 * (66,33 - 62,31) + w_3 * (5,86) \leq 0$$

Sous la contrainte :

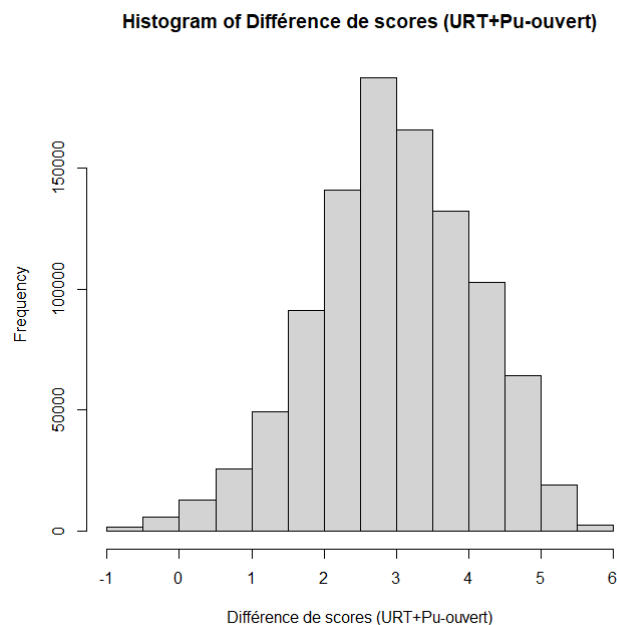
$$\begin{cases} w_1 + w_2 + w_3 = 1 \\ w_2 = w_3 \end{cases}$$

Avec w_1 , w_2 et w_3 les poids associés aux critères financiers, territoriaux et sociétaux respectivement. Pour des raisons de simplicité, le poids de la famille des critères territoriaux est supposé égal au poids de la famille de critères sociétaux.

Résoudre cette inéquation nous renseigne que pour n'importe quel poids supérieur à 83,16% environ pour la famille de critères financiers, le score du cycle ouvert agrégé au global des familles de critères et des parties prenantes est supérieur à celui du cycle URT+Pu.

Le deuxième calcul effectué est une simulation de Monte Carlo afin de calculer le pourcentage de combinaisons de poids entre les familles de critères pour lesquelles le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert.

L'histogramme suivant est simulé à partir d'1 000 000 de tirages aléatoires sur les poids.



Dans 99,30% des combinaisons de poids, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert dans les conditions de ce test.

Test à titre exploratoire 1 : inclusion des surcoûts des RNR et de l'indépendance en uranium naturel associée et poids inégaux entre les familles de critères

Le coût de déploiement des RNR et ses bénéfices potentiels n'apparaissent pas dans l'analyse principale. Les deux derniers tests sont réalisés à titre exploratoire avec des hypothèses très fortes afin d'observer l'évolution des résultats dans un scénario dans lequel les RNR sont atteints en cycle URT+Pu. Taylor et al., (2022) évoque une différence de coûts du cycle de l'ordre de 20% entre un cycle ouvert et un cycle 100% RNR. Le score du cycle URT+Pu est donc supposé à 80 et celui du cycle ouvert à 100.

Bien que les RNR coûtent relativement cher à déployer en comparaison d'un cycle ouvert, ce déploiement s'accompagne de bénéfices socio-environnementaux. En effet, un parc 100% RNR pourrait permettre de ne plus avoir à importer d'uranium naturel pendant une très longue période puisque la production des RNR repose sur l'utilisation des matières valorisables (MOXs usés et URE usé) ainsi que de l'uranium appauvri. Cela permet donc également de réduire grandement les activités de l'amont du cycle, en particulier les activités minières très polluantes. D'autres avantages pourraient être discutés sur l'implémentation d'un parc 100% RNR. Dans ce test de sensibilité, les critères environnementaux ne sont pas inclus car leur ampleur dans un parc RNR n'est pas identifiée. En revanche, le bénéfice en matière de souveraineté via l'indépendance de la France pour son approvisionnement en combustible est considéré avec un score de 100 en cycle 100% RNR. Les hypothèses des autres critères restent identiques (scénario conservateur).

Scénario	Cycle URT+Pu avec RNR	Cycle ouvert
Financier	80,00	100,00
Coûts du cycle	80,00	100,00
Territorial	67,84	24,62
Externalités économiques	67,84	24,62

Impacts riverains et territoires	Scores supposés identiques					
	Défavorable au traitement-recyclage		Neutre / Indéterminé		Favorable au traitement-recyclage	
Scénario	Cycle URT+Pu avec RNR	Cycle ouvert	Cycle URT+Pu avec RNR	Cycle ouvert	Cycle URT+Pu avec RNR	Cycle ouvert
Sociétal	43,98	57,06	77,78	54,86	82,40	55,73
Souveraineté	65,28	41,67	66,67	54,17	88,89	63,54
Indicateur : indépendance	100,00	27,78	100,00	50,00	100,0	43,75
Indicateur fiabilité	30,56	55,56	33,33	58,33	77,78	83,33
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

Les scores sont ensuite agrégés au niveau des familles de critères 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
Financier	80,00	100,00	80,00	100,00	80,00	100,00
Territorial	67,84	24,62	67,84	24,62	67,84	24,62
Sociétal	43,98	57,06	77,78	54,86	82,40	55,73
Score global	63,94	60,56	75,21	59,83	76,75	60,12

Dans cette configuration, on constate que le cycle URT+Pu est toujours préféré au cycle ouvert, quelles que soient les opinions des parties prenantes considérées pour les critères sociétaux.

La différence de coûts économiques entre les 2 cycles est davantage marquée. Le même calcul de valeur seuil que dans le test précédent est effectué ci-dessous pour la famille de critères financiers.

$$w_1 * (80 - 100) + w_2 * (67,84 - 22,62) + w_3 * 12,17 \leq 0$$

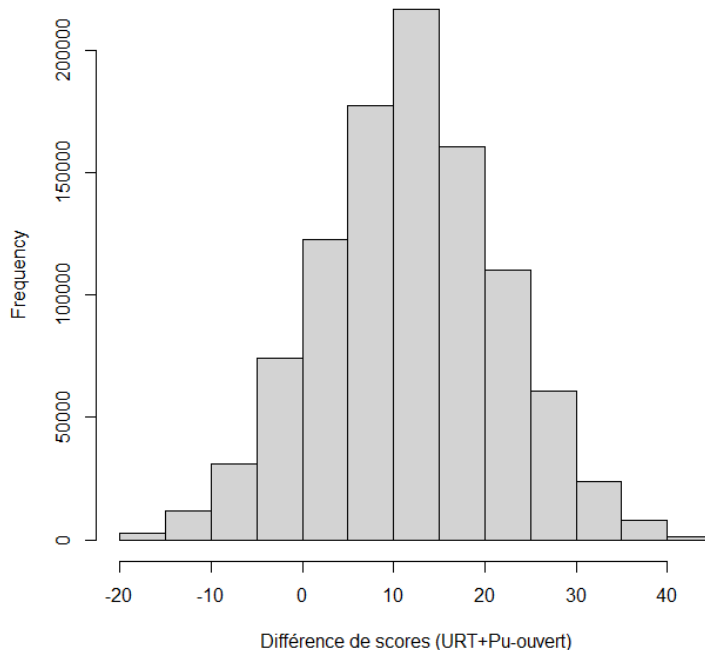
Sous la contrainte :

$$\begin{cases} w_1 + w_2 + w_3 = 1 \\ w_2 = w_3 \end{cases}$$

En résolvant l'inégalité en intégrant la contrainte, on déduit que si le poids accordé à la famille de critères financiers est supérieur à 58,07% (avec poids égaux entre les familles de critères territoriaux et sociétaux), le cycle ouvert est préféré.

Une simulation de Monte Carlo est réalisée comme dans la partie précédente pour couvrir l'ensemble des combinaisons de poids des familles de critères sans contrainte. L'histogramme ci-dessous montre le résultat d'1 000 000 de simulations sur les poids des familles de critère.

Histogram of Différence de scores (URT+Pu-ouvert)



Dans 88,09% des combinaisons de poids, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert dans les conditions de ce test.

Test à titre exploratoire 2 : inclusion des surcoûts des RNR et de l'indépendance en uranium naturel associée, absence d'impact sur les riverains en cycle ouvert et poids inégaux entre les familles de critères

Les mêmes tests que précédemment sont réalisés mais en incluant l'absence d'impacts sociaux sur les riverains et territoires en cycle ouvert. Les nouveaux scores par critère sont affichés ci-dessous.

Scénario	Cycle URT+Pu		Cycle ouvert			
Financier	80,00		100,00			
Coûts du cycle	80,00		100,00			
Territorial	66,33		62,31			
Externalités économiques	67,84		24,62			
Impacts riverains et territoires	64,83		100,00			
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	43,98	57,06	77,78	54,86	82,40	55,73
Souveraineté	65,28	41,67	66,67	54,17	88,89	63,54

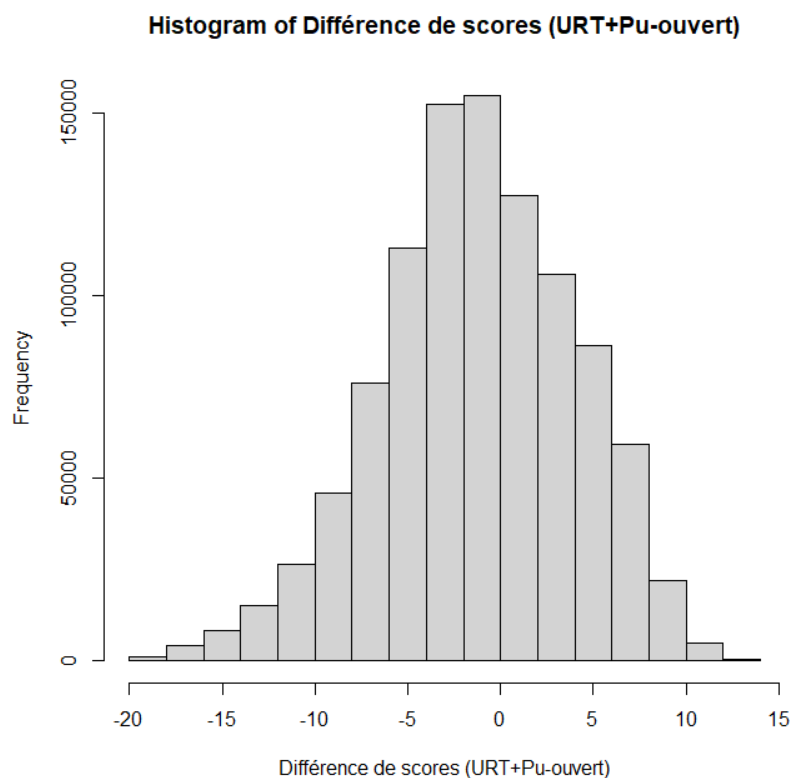
Indicateur : indépendance	100,00	27,78	100,00	50,00	100,0	43,75
Indicateur fiabilité	30,56	55,56	33,33	58,33	77,78	83,33
Leadership	55,55	69,44	77,78	52,78	84,03	39,35
Futures générations	21,76	36,57	91,67	29,17	75,00	40,05
Prolifération	33,33	80,56	75,00	83,33	81,67	80,00

Ces scores sont ensuite agrégés au niveau des familles de critères puis au global. Les résultats 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	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert	URT+Pu	Ouvert
Financier	80,00	100,00	80,00	100,00	80,00	100,00
Territorial	66,33	62,31	66,33	62,31	66,33	62,31
Sociétal	43,98	57,06	77,78	54,86	82,40	55,73
Score global	63,44	73,12	74,70	72,39	76,24	72,68

Dans cette configuration, on constate que le cycle URT+Pu est toujours préféré au cycle ouvert si l'on considère les scores des parties prenantes favorables et neutres pour les critères sociétaux. En revanche, l'écart s'est considérablement réduit. En retenant les scores des parties prenantes défavorables pour les critères sociétaux, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu.

Une simulation de Monte Carlo est également réalisée pour tester une multitude de combinaisons de poids des familles de critères. Cela donne alors les résultats suivants :



Dans seulement 40,45% des combinaisons de poids, le cycle URT+Pu domine le cycle ouvert dans les conditions de ce test, ce qui est bien inférieur aux résultats exposés dans les précédents tests. Dans une majorité des cas par conséquent, le cycle ouvert domine le cycle URT+Pu. Néanmoins, il est important de souligner que la famille de critères financiers n'est pas mise à l'échelle avec les valeurs monétaires des critères territoriaux, i.e. valeur ajoutée et recettes fiscales.

Les tests exploratoires incluant les RNR ne tiennent par ailleurs pas compte des autres bénéfices d'un tel cycle, notamment environnementaux. Ils reposent en outre sur d'importantes hypothèses appliquées dans un contexte futur très lointain qui sera complètement différent, y compris pour l'ensemble des autres critères dont les résultats sont supposés identiques à ceux de l'analyse principale dans ces tests.

9.3. / Contexte historique du cycle du combustible au Royaume-Uni et en Suède

Cette annexe présente des éléments de retour d'expérience portant sur les contextes britanniques et suédois. Les 2 monographies proposées s'appuient sur une analyse (limitée) de la bibliographie et des échanges avec certains acteurs : Environment Agency et NDA au Royaume-Uni, SSM et SKB en Suède.

ROYAUME-UNI

Environ 15% de l'électricité produite au Royaume-Uni est d'origine nucléaire. La plupart des réacteurs en exploitation seront mis à l'arrêt d'ici à 2030, mais le Royaume-Uni a engagé un plan de développement de nouvelles capacités visant une puissance installée de 24 GW d'ici à 2050, qui devrait alors fournir 25% de l'électricité produite sur le territoire britannique.

Le Royaume-Uni a connecté au réseau un 1^{er} réacteur nucléaire dès 1956 à Calder Hall. Une flotte comprenant 26 réacteurs Magnox (aujourd'hui tous à l'arrêt définitif), 14 réacteurs AGR (advanced gas-cooled reactors) et 1 REP (Sizewell B) a été construite et exploitée. Pendant longtemps, le Royaume-Uni disposait en propre de capacité de conversion de l'uranium, ce qui n'est plus le cas aujourd'hui (fermeture de l'usine de Springfields en 2014). L'enrichissement de l'uranium est réalisé dans les installations Urenco à Capenhurst. Une installation de déconversion (UF₆ vers U₃O₈) a été inaugurée en 2019, également sur le site de Capenhurst. Le combustible pour les réacteurs AGR et REP est fabriqué à Springfields. En décembre 2022, le gouvernement britannique a annoncé une enveloppe de 13 millions £ pour le développement d'une installation de conversion de l'uranium naturel et de l'URT à l'horizon 2028. En janvier 2023, le gouvernement a débloqué 75 millions £ dans le développement (sur le territoire britannique) et la commercialisation de services de conversion et de fabrication de combustibles, en partie pour réduire sa dépendance au combustible russe.

Le Royaume-Uni a également longtemps disposé à Sellafield d'installations de traitement du combustible usé. Une usine de traitement (capacité de 1500 t.an⁻¹) a traité de 1964 à 2022 le combustible des réacteurs Magnox. L'usine Thorp (Thermal Oxide Reprocessing Plant, capacité de 600 t.an⁻¹) a traité 9 331 tonnes de combustibles avant sa mise à l'arrêt définitive en novembre 2018. Le combustible traité provenait à 60% des centrales britanniques. Une installation de fabrication de combustible MOX (SMP, Sellafield MOX Plant) a été construite sur le site de Sellafield (637 millions £, capacité prévue de 120 t.an⁻¹). En 8 années de fonctionnement, de 2001 à 2008 (coût d'exploitation : 626 millions £), cette usine n'avait produit que 8 tonnes de MOX. Elle a arrêté sa production en 2012 (entraînant la perte de 600 emplois).

En 2019, le Royaume-Uni disposait d'un stock de 112 tML de plutonium. Différentes options de gestion ont été étudiées. Toutes ces options présentent un coût supérieur au bénéfice, la production de combustible MOX paraissant néanmoins la moins désavantageuse. Parmi ces options, la construction de réacteurs à neutrons rapides portée par GE-Hitachi (PRISM) n'a pas été retenue car jugée non crédible en raison de son coût et des développements techniques nécessaires. Afin d'anticiper l'arrêt du traitement du combustible usé, un entreposage à sec pour gérer le combustible usé de Sizewell B a été construit, utilisant la technologie Holtec Hi-Storm.

SUÈDE

A la fin de la Seconde Guerre Mondiale, la Suède a créé des organisations de recherche sur l'énergie nucléaire et ses applications, tant civiles (Atomic Commission) que militaires (National Defense Research Institute). Au début des années 50, l'Atomic Commission a proposé au gouvernement de mettre en place un cycle nucléaire domestique complet et fermé depuis la mine jusqu'au traitement du combustible usé.

La construction d'un premier réacteur de recherche, baptisé R1, sur le campus de l'Institut Royal de Technologie (KIT, Stockholm), est décidée en 1954 par l'Atomic Energy Company (*Atomenergi AB*). Un deuxième réacteur de recherche R2

est construit à proximité de la mer Baltique afin de mener des recherches sur le combustible nucléaire. Les réacteurs suivants sont des prototypes (démonstrateurs) de réacteurs de production d'électricité : R3 *Ågesta* est construit au sud de Stockholm (début des travaux en 1957) et R4 *Marvinken* à Norrköping (début des travaux en 1959). De conception suédoise, ces réacteurs utilisaient de l'uranium non-enrichi et de l'eau lourde. En parallèle, de nombreux projets de recherche portant sur les technologies du traitement du combustible sont lancés en 1950 et vont se poursuivre jusqu'au milieu des années 70.

Les prototypes d'*Ågesta* et de *Marvinken* ont montré que la technologie à eau lourde n'était pas la plus compétitive et que des améliorations devaient être apportées avant d'envisager un déploiement industriel. Des considérations économiques et politiques, notamment sur le risque de prolifération de technologies sensibles, ont finalement conduit la Suède à réduire ses ambitions et à recentrer son programme sur la production d'électricité.

Le choix de la technologie des réacteurs a fait l'objet de débats entre l'État, l'Atomic Energy Company et les producteurs d'électricité (Vattenfall notamment). La technologie à eau lourde fut abandonnée et une stratégie de diversification retenue : progressivement, de 1972 à 1985, douze réacteurs à eau légère de type bouillant ou pressurisé sont construits sur 4 sites côtiers : Forsmark, Oskarshamn, Barsebäck et Ringhals. Ces 12 réacteurs assureront la moitié de la production d'électricité du pays.

Avec le développement du parc nucléaire, le ministère suédois de l'Industrie a mandaté (1974) un groupe d'experts pluralistes (Government Committee on Radioactive Waste, AKA) pour étudier la question du devenir du combustible usé. Ce groupe a recommandé la construction d'une installation de recyclage du combustible pour traiter 800 tML par an (personnel nécessaire : 1 000 employés) et d'installations pour fabriquer du combustible MOX. Le comité AKA proposait cependant de ne pas écarter complètement l'option du cycle ouvert.

Jusqu'au milieu des années 1970, les décisions portant sur la politique énergétique du pays étaient prises par l'État, au sein de comités gouvernementaux, de groupes d'experts, etc. La montée d'une tendance anti-nucléaire en Suède, portée par des réseaux d'activiste puis soutenue par l'un des principaux partis du pays, conduit à ce que la politique énergétique, et le nucléaire en particulier, deviennent des enjeux politiques. En 1976, un gouvernement de coalition de centre-droit, donc partiellement anti-nucléaire, est élu.

En avril 1977, le gouvernement vote le Nuclear Stipulation Act qui met en place une taxe sur le kWh électrique produit par l'exploitant afin de financer le programme de démantèlement des centrales et les installations de stockage et d'entreposage des déchets. Le fond ainsi constitué est géré par la banque nationale de Suède et le National Board for Spent Fuel (SKN). La responsabilité de la gestion des déchets incombe pleinement aux exploitants. Les exploitants vont alors fonder la Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB), une société en charge de gérer le combustible et les déchets nucléaires.

Un rapport, dit KBS-1, est publié en 1977. Il s'intéressait aux modalités d'entreposage des déchets de haute activité vitrifiés issus d'un procédé de retraitement. Il présentait les avantages et inconvénients de cette stratégie : le retraitement permet d'extraire des matières d'intérêt (uranium et plutonium) afin de les utiliser pour produire de l'énergie, réduisant le besoin en uranium naturel (réduction estimée à 30-35 %) et en capacité d'enrichissement (réduction estimée à 15-20 %), avec en contrepartie une augmentation du potentiel du risque de prolifération. Ce rapport indiquait également que la Suède disposait des formations géologiques et de la technologie pour entreposer des déchets vitrifiés et précisait que, les capacités de retraitement étant limitées, les capacités d'entreposage du combustible usé du pays devaient être augmentées. Un second rapport, KBS-2 (1978), développait un projet d'entreposage de combustible usé sans retraitement. L'accident de la centrale Three Miles Island en mars 1979 a conduit à l'organisation d'un référendum consultatif sur le futur du nucléaire. A la suite du référendum, le Parlement choisit en juin 1980 le maintien du programme de construction des réacteurs et un arrêt complet des réacteurs en 2010. C'est dans ce contexte que le 3^{ème} et dernier rapport du projet KBS est publié (1983). Le document présente une mise à jour des investigations pour identifier un site d'entreposage, et décrit les spécificités techniques ainsi que les fonctions de sûreté associée à cette solution.

En 1982, à l'occasion d'une session parlementaire portant sur l'autorisation d'exploitation de deux nouveaux réacteurs (Oskarshamn 3 et Forsmark 3), le Parti du Centre a émis une réserve portant sur le recyclage en argumentant d'un risque de prolifération. Cette réserve fut réitérée en 1983. Peu après, le parti modéré a à son tour proposé d'exclure par la loi le recyclage, et de se concentrer sur l'entreposage du combustible usé. Les exploitants finirent par mettre un terme au recyclage du combustible usé et à dénoncer les contrats de retraitement en vigueur.

L'installation CLAB (Central interim storage facility for spent fuel, *Central Lager för Använt Bränsle*) située sur le site de la centrale d'Oskarshamn permet d'entreposer pour une durée visée de 30-40 ans les assemblages provenant des centrales nucléaires et des réacteurs de recherche. L'installation initialement dimensionnée pour 8 000 t de combustible sera agrandie pour accueillir 11 000 t. Les premiers assemblages sont accueillis à partir de 1985.

En 1997, la date d'arrêt des réacteurs fixée à 2010 est repoussée dans le cadre d'une loi de planification énergétique. Les arrêts et fermetures de réacteurs se sont échelonnées au fil des années : Barseback 1 en 1999, Barseback 2 en 2005, Oskarshamn 1 et 2 en 2015 et 2016 et Ringhals 1 en 2019, laissant 6 réacteurs en opération, assurant 30 % des besoins en électricité du pays.

Le 16 mars 2011, SKB a déposé une demande de licence générique pour construire et exploiter un stockage géologique situé à 500 m de profondeur sur le site de Forsmark. Cette demande de licence a finalement été acceptée en mars 2022.

Le 9 août 2023, la Ministre du Climat et de l'Énergie a annoncé que le gouvernement suédois prévoyait la construction de 10 nouveaux réacteurs nucléaires afin d'assurer les besoins en électricité du pays (prévu pour doubler d'ici 20 ans) tout en limitant les rejets de gaz à effet de serre (actuellement, la Suède importe de l'électricité produite en Pologne par des centrales au charbon en hiver). Un projet de loi sera soumis au parlement à l'automne 2023.

En Suède, les décisions stratégiques en matière de cycle électronucléaire ont fait intervenir plusieurs facteurs ou critères. Ces éléments n'ont généralement pas fait l'objet d'analyses quantitatives (du moins de telles informations n'ont pas été identifiés dans le cadre de cette étude) et il semble que le politique et le sociétale aient au fil du temps pris le pas sur des critères d'ordre plus technique et économique. Parmi les critères d'intérêt, on relève en particulier :

1. La technologie : maturité, disponibilité, économiquement avantageuse,
2. Le risque de prolifération,
3. La politique et en particulier l'évolution de l'opinion publique et des attentes sociétales,
4. Le maintien dans la mesure du possible d'alternatives,
5. La protection de l'environnement.