

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	1/90

Direction de l'énergie nucléaire
Direction de l'innovation et du soutien nucléaire
Programme Aval du Cycle

Document Technique DEN

***Inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et
des déchets radioactifs produits par le parc français
selon différents scénarios d'évolution***

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre : Saclay – Bt 121
Adresse : DEN/DISN 91191 GIF SUR YVETTE
Établissement public à caractère industriel et commercial
RCS Paris B 775 685 019

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	2/90

Le présent rapport répond à l'article 51 de l'arrêté du 23 février 2017 pris en application des prescriptions de l'édition 2016-2018 du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR).

Article 51

Le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 un inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs présents dans les combustibles usés qui seraient produits par le parc de réacteurs électronucléaires français selon différents scénarios, notamment dans le prolongement de ceux étudiés avec EDF et Areva au titre du PNGMDR 2013-2015.

Le CEA présente également dans cette étude, en lien avec l'ANDRA, l'estimation de l'emprise totale de ces substances radioactives en stockage en couche géologique profonde. L'ASN est saisie pour avis sur cette étude.

Il dresse le bilan des études de caractérisation technique de scénarios prospectifs mettant en œuvre différentes options de cycle du combustible et de gestion des matières uranium et plutonium : cycle ouvert, cycle mono-recyclage, cycle bi-recyclage REP puis RNR, cycle fermé avec RNR (100% ou hybrides RNR/REP), en considérant aussi d'autres options telles que le multi-recyclage en REP. L'évaluation des flux, des inventaires de matières et des déchets est présentée selon deux approches, l'une dite statique ou à l'équilibre (on emploiera le terme « palier » dans la suite du document), en supposant que chaque option est artificiellement maintenue suffisamment longtemps, la seconde dite dynamique, qui s'appuie sur des évolutions du système électronucléaire français en partant de la situation actuelle et en la faisant évoluer vers de nouvelles options de cycle selon des chroniques établies (on parle alors dans la suite du document de « scénarios de transition »).

Ces évaluations seront donc présentées :

- a) **Par paliers**, ce qui permet de juger de la valeur intrinsèque d'une option de cycle et de permettre les comparaisons des mérites mais aussi des détriments entre options ;
 - b) **En dynamique**, ce qui permet d'établir des scénarios de transition possibles, d'en évaluer la faisabilité technique et économique, et d'anticiper les éventuelles difficultés pour leur déploiement ;
- En particulier, les inventaires des matières et déchets pour les années 2016 et 2100 sont indiqués.**

Ces scénarios sont identiques en termes d'hypothèses et de chroniques aux scénarios prospectifs de l'édition 2018 de l'Inventaire National des matières et déchets radioactifs.

Il est également rappelé qu'un premier jeu de conclusions a été rapporté en juin 2015 dans le cadre du *dossier 2015*¹ remis par le CEA au Gouvernement au titre de l'arrêté du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions de l'édition 2013-2015 du PNGMDR. Le présent rapport s'inscrit dans la continuité de ces premières études et complète les conclusions établies en 2015. Signalons enfin que les conclusions présentées ci-dessous sont le fruit d'un travail collectif mené entre CEA, Orano, Framatome et EDF dans le cadre d'un programme d'études triennal devant s'achever fin 2018 et ont également été nourries de nombreux échanges avec l'Andra.

¹ Rapport CEA « Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides » remis au ministre chargé de l'énergie en juin 2015, en réponse au Décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	3/90

Les principaux enseignements de ces études sont les suivants.

Déploiement progressif des RNR avec multi-recyclage de l'uranium et du plutonium

Les caractérisations complémentaires menées par rapport aux études rapportées dans le *dossier 2015* (introduction d'ASTRID-600 MW (électriques) dans le calcul des flux matières en substitution d'un des trois réacteurs 1000 MW (électriques) considérés dans les études initiales) confirment que l'évolution du cycle « mono-recyclage » vers un cycle fermé conduit à améliorer, à chacune des étapes ou paliers industriels², les grandeurs caractéristiques d'une gestion durable du cycle, notamment la consommation en uranium naturel, la valorisation des matières présentes dans les combustibles usés en entreposage (MOX REP et URE) et la production de déchets ultimes. L'ensemble des caractérisations confirment l'intérêt d'une telle démarche progressive, qui permet par ailleurs d'améliorer à chaque palier la maturité industrielle des RNR et des usines du cycle associées.

La démarche progressive dont le premier palier (« palier B ») consisterait en l'introduction dans la seconde moitié de ce siècle de deux premiers réacteurs RNR en plus d'ASTRID-600 MW offrirait également un niveau de flexibilité intéressant en cas de renchérissement de la ressource uranium ou en considérant d'autres facteurs externes amenant à déployer des RNR plus rapidement que prévu.

Le cycle actuel présente d'ores et déjà les bénéfices suivants :

- Une diminution significative, de l'ordre d'un facteur 5, des volumes de déchets ;
- L'absence de plutonium dans ces déchets et donc une diminution de l'ordre d'un facteur 10 de la radiotoxicité long terme des déchets finaux comparativement au combustible usé généré par un parc fonctionnant en cycle ouvert, sans toutefois considérer la radiotoxicité du combustible usé MOX supposé être valorisé ultérieurement ;
- Le plutonium, extrait du combustible usé puis totalement recyclé, sert à produire immédiatement de l'électricité (10% de la production électrique d'origine nucléaire chaque année) ; la fraction de plutonium non fissionné reste présente et disponible dans les combustibles usés MOX pour déployer ultérieurement les réacteurs de 4^{ème} génération et produire à leur tour de l'électricité pour les générations futures ;
- Une économie actuelle de la ressource uranium venant de la mine de l'ordre de 10% par le recyclage du plutonium, auxquels peuvent s'ajouter de l'ordre de 10% supplémentaires avec le recyclage de l'uranium³ ;
- Une maîtrise des entreposages de combustibles usés en attente de traitement pour recyclage : les 1000 à 1100 tonnes d'assemblages UOX usés déchargés du parc chaque année sont intégralement

² Le scénario industriel pris en compte pour les études est constitué de 4 paliers : (A) la poursuite du mono-recyclage sans RNR, (B) le recyclage des MOX usés REP dans des premiers RNR (ASTRID 600 MW et 2 RNR 1000 MW), (C) la stabilisation de l'inventaire Pu par multi-recyclage, (D) l'indépendance énergétique par multi-recyclage du Pu dans les RNR (parc REP avec MOX et RNR). Le palier (O) correspondrait à un cycle ouvert.

³ Comme par exemple au début des années 2010 avec une moyenne de 12% d'économie supplémentaire à celle déjà obtenue par le recyclage du Pu en MOX

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	4/90

retraitées aujourd'hui, stabilisant de facto l'inventaire à un peu plus de 10 000 tonnes. Seuls les inventaires en assemblages MOX usés et le cas échéant en assemblages URE usés augmentent aujourd'hui, au rythme d'un peu plus d'une centaine de tonnes par an pour les MOX et d'un peu moins d'une centaine de tonnes pour les URE (lorsque ces dernières gestions sont mises en œuvre) ;

La constitution d'un inventaire en ressource plutonium et la maîtrise technologique du traitement recyclage peuvent constituer par ailleurs « l'assurance » pour les générations futures d'une production d'électricité souveraine, permettant de s'affranchir de tout approvisionnement en uranium de la mine. Le cycle fermé réalise pleinement les objectifs de durabilité avec l'introduction des RNR, lorsque l'évolution du marché de l'uranium justifie l'investissement dans un parc de RNR.

Multi-recyclage de l'uranium et du plutonium en REP :

Les options de multi-recyclage des matières uranium et plutonium en REP ont été analysées sous l'aspect gestion des matières et des déchets. Les résultats montrent que les concepts d'assemblages CORAIL et MIX stabilisent les inventaires de combustibles usés (y compris ceux des combustibles MOX et URE) et de plutonium. Comparé au mono-recyclage de l'uranium et du plutonium, elles réduisent le besoin de ressources en uranium naturel lorsque le recyclage de l'uranium de traitement est mis en œuvre, ce qui se traduit par un peu plus de 25 % d'économie de ressources comparé au cycle ouvert. Parmi les concepts envisagés, les concepts CORAIL (crayons MOX et crayons UOX au sein d'un même assemblage) et MIX (MOX à support uranium enrichi) sont à date les plus accessibles compte tenu du savoir-faire français acquis sur le mono-recyclage en REP. Le déploiement à l'échelle du parc pourrait s'envisager d'ici 20 à 30 ans. Les études préliminaires ne montrent pas à ce stade d'aspects rédhibitoires sur le fonctionnement des réacteurs mais ces résultats doivent être encore consolidés par des études d'ingénierie complémentaires. Pour un déploiement à l'échelle du parc, ces concepts nécessitent des réacteurs adaptés aux combustibles MIX ou CORAIL et dont le nombre varie selon le concept et la configuration d'assemblage considérée (par exemple 30% du parc pour les gestions MIX). Ils nécessitent aussi de nouvelles usines du cycle, avec notamment des capacités de gestion du plutonium triplées.

Sur les ~7 t/an de plutonium introduit dans les réacteurs MIX d'un parc supposé à l'équilibre, de l'ordre de 4,2 à 4,5 t/an d'actinides mineurs (Neptunium, Américium, Curium) sont produits selon la configuration d'assemblage et de parc considérée, soit une augmentation de ces derniers de l'ordre de 30% dans les scénarios étudiés, par rapport au mono-recyclage (3,3 t/an). A l'équilibre du parc, 45% du plutonium se transforme ainsi par captures neutroniques en actinides mineurs, les 55% complémentaires étant essentiellement fissionnés pour produire de l'énergie. Par voie de conséquence le nombre de colis de verre produits annuellement, sensible à la quantité de radio-isotopes alpha (^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm pour les principaux émetteurs) du combustible traité, augmente d'un facteur 2 (0,52 m³/TWh pour 0,26 m³/TWh en mono-recyclage) avec les hypothèses du scénario considéré dans cette étude⁴. En revanche, si la phase de multi-recyclage en REP est suivie de la mise en œuvre

⁴ Des voies d'optimisation sont toutefois investiguées pour limiter cette augmentation sensible au 1^{er} ordre au flux d'Américium, de décroissance (^{241}Am) ou produit par capture (^{243}Am), dirigé à la vitrification lors des opérations de traitement du combustible usé, en oeuvrant lorsque cela est possible, sur l'ordonnancement au traitement des combustibles usés,

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/NA/CF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	5/90

d'un parc de RNR, tous les combustibles usés sont alors valorisés et les déchets conditionnés, diminuant d'autant l'emprise globale au stockage des déchets. Des optimisations supplémentaires, notamment au niveau des temps de refroidissement avant traitement sont à investiguer, pour diminuer encore l'emprise au stockage.

Dans le cas d'une mise en œuvre de façon transitoire entre le mono-recyclage actuel et le déploiement des RNR, les options de multi-recyclage en REP permettent de faire progresser les procédés et la maturité industrielle des usines du cycle nécessaires au développement des RNR, les flux annuels de plutonium et de combustible MOX à l'équilibre se situant à un niveau intermédiaire entre ceux nécessaires au mono-recyclage et ceux qui seraient nécessaires pour une flotte de RNR. Des étapes de ces procédés industriels sont toutefois de TRL⁵ bas et requièrent des travaux de recherche significatifs.

Le multi-recyclage en REP dégrade la qualité du plutonium actuellement gardé en ressource pour le démarrage de la filière RNR (de l'ordre de 45% de ²³⁹Pu+²⁴¹Pu par exemple pour le MIX à l'équilibre, à comparer à ~50% pour un MOX usé et un peu plus de 60% pour un UOx usé). Il a la capacité de stabiliser voire de réduire l'inventaire plutonium. Un déploiement rapide de ces concepts pourrait conduire à un inventaire de plutonium inférieur à celui nécessaire à un déploiement accéléré des RNR à puissance installée constante. Ce déploiement pourrait donc être rendu délicat selon les hypothèses de scénarios, et pourrait être ralenti par manque de ressource plutonium.

Il est à noter que les performances techniques du multi-recyclage en REP en termes d'utilisation de la ressource en uranium naturel ou de production des déchets restent très en retrait des performances atteintes par des réacteurs à neutrons rapides qui demeurent l'option la plus pertinente aujourd'hui dans un objectif de fermeture du cycle. La complexification du cycle en multi-recyclage REP par rapport au mono-recyclage devra être évaluée au regard d'hypothèses de flux affinées sur les matières recyclées, de l'analyse approfondie de faisabilité industrielle et des progrès technologiques à mettre en œuvre pour les réacteurs et les usines du cycle.

Les études confiées au groupe de travail quadripartite sur la 4^{ème} génération se poursuivent en 2018 avec un scénario de déploiement en multi-recyclage en REP plus progressif que celui étudié en 2017. Ce scénario s'appuie jusqu'à l'horizon de la moitié de ce siècle sur les capacités des usines actuelles. Elles seront complétées par une analyse de la faisabilité industrielle du multi-recyclage en REP pour les aspects réacteurs, industries du cycle, transports, impact sur la production des déchets, et économiques.

Inventaire en 2016 et 2100 des matières et déchets

Les quantités de matières et de déchets sont indiquées dans les tableaux du paragraphe 4.6. La dynamique d'évolution de ces inventaires au cours de ce siècle décrite au chapitre 4 permet de mieux analyser ces quantités pour l'année 2100.

⁵ Technology Readiness Level, indicateur du niveau de maturité d'un procédé ou d'une technologie

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	6/90

Emprises au stockage

L'emprise au stockage a été évaluée au regard notamment du critère thermo-hydro-mécanique (THM) en s'appuyant notamment sur les résultats établis par l'Andra. Contrairement aux études précédemment réalisées par l'Andra et le CEA dans la perspective de futurs parcs, la présente étude introduit également des cas de stockage direct de combustibles usés. Cette étude pour le stockage éventuel de combustibles usés non retraités n'est toutefois raisonnablement pas assez avancée pour la présente évaluation, particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer des emprises souterraines de stockage pour des quantités importantes de combustibles usés présentant des dégagements thermiques élevés. Cela limite les résultats de la présente étude pour les scénarios faisant appel au stockage direct de combustibles usés.

Toutefois, les évaluations d'emprise des déchets HA (colis de verre) ont pu être menées à leur terme et sont rapportées dans le présent document pour l'ensemble des options de cycle considérées (mono-recyclage, bi-recyclage, multi-recyclage en REP, multi-recyclage en RNR).

Ces études ont également permis de montrer que la thermique de l'²⁴¹Am est dans presque toutes les catégories de déchets de haute activité à stocker (avec aussi dans une certaine mesure le ²³⁸Pu pour les combustibles usés), l'élément déterminant pour l'estimation des emprises compte tenu de l'évolution récente des critères de dimensionnement dans une roche de type argilite et du critère thermo-hydro-mécanique en particulier. L'ordonnement au traitement des combustibles entreposés constitue une piste à investiguer, de façon à limiter la production d'²⁴¹Am par décroissance radioactive du ²⁴¹Pu lors de l'entreposage des combustibles usés, et ainsi optimiser l'emprise au stockage.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	7/90

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Vers une gestion durable des déchets et des matières : quelles options de cycle ? quels scénarios de transition possibles ?.....	12
2.1. Le parc actuel avec mono-recyclage	12
2.2 L'intérêt de principe des réacteurs rapides	13
2.3 Les options de cycle avec RNR : une approche par paliers successifs.....	14
2.4 Le multi-recyclage des matières en REP.....	16
2.5 Principaux indicateurs de caractérisation technique des options de cycle et des scénarios de transition :	18
2.6 Evolutions des hypothèses entre le « dossier 2015 » et les études menées en 2017-2018.....	18
3. Evaluation de la performance technique des options de cycle du combustible (approche à l'équilibre)	19
3.1 Caractérisation des paliers comportant une part croissante de RNR	19
3.1.1 Les matières.....	20
3.1.2 Les déchets	25
3.1.3 Les transports de combustible	30
3.1.4 Evaluations comparées des options (matières et déchets)	32
3.2 Caractérisation du multi-recyclage en REP pour les concepts MIX et CORAIL.....	35
3.2.1 Les matières.....	35
3.2.2 Les déchets	38
3.2.3 Evaluations comparées des options (matières et déchets)	40
4. Evaluation de la performance technique des scénarios de transition (approche dynamique)	45
4.1. Scénarios de transition retenus pour l'étude.....	45
4.2. Evaluation des scénarios de déploiement progressif des RNR	46
4.2.1 Description des transitions.....	46
4.2.2 Les matières.....	50
4.3. Les scénarios de multi-recyclage Pu en REP.....	57
4.3.1 Description des transitions.....	57

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	8/90

4.3.2 Les matières.....	60
4.3.3 Impact sur le démarrage des RNR.....	66
4.4. Le scénario de non renouvellement du parc.....	67
4.4.1 Description du scénario.....	67
4.4.2 Les matières.....	68
4.5. Les déchets.....	71
4.6. Les transports.....	73
4.7. Synthèse de l’inventaire prospectif sur les matières et déchets en 2016 et 2100.....	74
5. Emprise au stockage pour les scénarios de déploiement progressif des RNR.....	78
5.1 Objectifs de l’étude.....	78
5.2 Evolution des critères par rapport au « dossier Argile 2005 ».....	79
5.3 Résultats d’évaluation des emprises au stockage.....	80
6. Conclusion.....	85
Annexe 1 : Hypothèses sur les performances des réacteurs et des usines du cycle.....	89

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	9/90

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Eléments de structure des combustibles.....	26
Tableau 2: Caractéristiques des combustibles refroidis 5 ans	27
Tableau 3: Estimation de la production de déchets par catégorie pour différentes options de déploiement progressif de RNR, ramenée au TWh moyen produit par le parc entier	30
Tableau 4: Evaluation du nombre d'opérations de transport nécessaires dans les différents paliers par rapport au palier A	31
Tableau 5 : Caractérisation des flux de matières et de déchets pour des options de cycle avec déploiement progressif des RNR et comparaison avec le cycle actuel mono-recyclage prolongé et le cycle ouvert.....	34
Tableau 6: Estimation de la production de déchets pour différentes options de multirecyclage en REP, ramenée au TWh moyen produit par le parc entier	39
Tableau 7 : Caractérisation des flux de matières pour des options de cycle avec multi-recyclage en REP et comparaison avec le cycle actuel mono-recyclage prolongé, le cycle 100% RNR et le cycle ouvert	41
Tableau 8 : cumul des déchets HA de type CSD-V sur la période 2016 – 2100 (m ³).....	72
Tableau 9: cumul des déchets HA de type CSD-V sur la période 2050 – 2210 (m ³).....	72
Tableau 10 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2016 – 2100 (m ³)	73
Tableau 11 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2050 - 2210 (m ³)	73
Tableau 12 : ratio du nombre de transports sur la période 2050-2210 par rapport au scénario A	73
Tableau 13 : Inventaires prospectifs des matières en 2016 et 2100 (exprimés en tonnes)	76
Tableau 14 : cumul des déchets HA sur la période 2016 – 2100 (m ³).....	77
Tableau 15 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2016 – 2100 (m ³)	77
Tableau 16 : emprises estimées selon la durée d'entreposage pour les paliers B, D1 et D2 (paramètres THM conservatifs).....	82
Tableau 18 : emprises estimées pour les déchets HA (colis de verre) ; nombre d'assemblages usés à stocker pour chaque option de cycle et puissance thermique associée.....	84

Liste des Figures

Figure 1 : approche progressive et par palier du déploiement des RNR	14
Figure 2: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABCD1	49
Figure 3: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABCD2	50
Figure 4: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABD2	50
Figure 5 : Consommation d'uranium naturel cumulée pour les scénarios de déploiement des RNR et comparaison avec les scénarios de poursuite du mono-recyclage et du cycle ouvert.....	51
Figure 6 : Comparaison de l'évolution des inventaires d'uranium appauvri pour les scénarios de déploiement des RNR, de mono-recyclage et de cycle ouvert	52

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	10/90

Figure 7 : Evolution de l'inventaire global Pu pour les scénarios de déploiement des RNR.....	53
Figure 8 : Scénario ABD2 – répartition par postes de l'inventaire global en plutonium	54
Figure 9 : Evolution des entreposages de combustibles usés pour les scénarios de transition	55
Figure 10 : Evolution de l'inventaire global en actinides mineurs pour les scénarios de déploiement RNR.....	56
Figure 11 : Scénario ABD2 – répartition de l'inventaire global en actinides mineurs.....	56
Figure 12 : Evolution des stocks d'uranium de retraitement pour les scénarios de déploiement des RNR	57
Figure 13 : Evolution de la composition du parc pour les scénarios MIX sans gestion URE	59
Figure 14 : Evolution de la composition du parc pour le scénario MIX 9,54% avec gestion URE	59
Figure 15 : Evolution de la composition du parc pour le scénario CORAIL	60
Figure 16 : Consommation d'uranium naturel pour les scénarios MIX et CORAIL comparés aux scénarios A, ABD2 et ABCD1	61
Figure 17 : Enrichissement du support uranium des combustibles MIX au fur et à mesure des recyclages	62
Figure 18 : Evolution de l'inventaire global Pu pour les scénarios de multi-recyclage Pu en REP.....	63
Figure 19 : Répartition de l'inventaire en plutonium pour le scénario MIX 9,54% (sans URE).....	63
Figure 20 : Répartition de l'inventaire en plutonium pour le scénario CORAIL.....	64
Figure 21 : Evolution des inventaires de combustibles usés totaux pour les scénarios MIX et CORAIL..	64
Figure 22 : Inventaire en actinides mineurs pour les scénarios MIX, CORAIL comparés aux scénarios A et ABCD1.....	65
Figure 23 : Scénario MIX 9,54% - évolution de l'isotopie Pu au cours des recyclages.....	66
Figure 24 : Evolution de la production électrique pour le scénario d'arrêt du parc.....	68
Figure 25 : Evolution de l'inventaire plutonium dans les réacteurs et les installations du cycle entre scénario A et arrêt du parc à VD4	69
Figure 26 : Evolution de l'inventaire en actinides mineurs entre scénario A et arrêt du parc à VD4.....	69
Figure 27 : Scénario d'arrêt du parc à VD4 : répartition des actinides mineurs dans le parc.....	70
Figure 28 : Evolution des besoins en entreposage de combustibles usés entre scénario A et arrêt du parc à VD4	70
Figure 29 : découpage latéral sur la ZIRA en 3 zones avec des valeurs de paramètres THM constantes par zone (Zone Sud-Ouest considérée en référence pour cette étude)	80
Figure 30 : Evolution de la contrainte effective selon les paramètres THM (Palier D1 – 80 ans d'entreposage)	81

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	11/90

Préambule : Ce rapport présente une synthèse des études menées au CEA de 2015 à 2018 dans le cadre d'une collaboration avec Orano, EDF, Framatome et l'Andra. De nombreux résultats établis par les équipes du CEA ont été échangés, discutés, débattus et ont été enrichis avec l'expertise, notamment industrielle, des représentants de ces entités. Les auteurs de ce rapport tiennent à remercier ici l'ensemble des équipes contributrices CEA⁶ ainsi que les experts extérieurs.

1. Introduction

Le présent rapport répond à l'article 51 de l'arrêté du 23 février 2017 pris en application des prescriptions de l'édition 2016-2018 du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR).

Article 51

Le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 un inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs présents dans les combustibles usés qui seraient produits par le parc de réacteurs électronucléaires français selon différents scénarios, notamment dans le prolongement de ceux étudiés avec EDF et Areva au titre du PNGMDR 2013-2015.

Le CEA présente également dans cette étude, en lien avec l'ANDRA, l'estimation de l'emprise totale de ces substances radioactives en stockage en couche géologique profonde. L'ASN est saisie pour avis sur cette étude.

Il dresse le bilan des études de caractérisation technique de scénarios prospectifs mettant en œuvre différentes options de cycle du combustible et de gestion des matières uranium et plutonium : cycle ouvert, cycle mono-recyclage, cycle bi-recyclage REP puis RNR, cycle fermé avec RNR (100% ou hybrides RNR/REP), en considérant aussi d'autres options telles que le multi-recyclage en REP. L'évaluation des flux, des inventaires de matières et des déchets est présentée selon deux approches, l'une dite statique ou à l'équilibre (on emploiera le terme « palier » dans la suite du document), en supposant que chaque option est artificiellement maintenue suffisamment longtemps, la seconde dite dynamique, qui s'appuie sur des évolutions du système électronucléaire français en partant de la situation actuelle et en le faisant évoluer vers de nouvelles options de cycle selon des chroniques établies (on parle alors dans la suite du document de « scénarios de transition »).

Ces évaluations seront donc présentées :

- a) **Par paliers**, ce qui permet de juger de la valeur intrinsèque d'une option de cycle et de permettre les comparaisons des mérites mais aussi des détriments entre options ;
- b) **En dynamique**, ce qui permet d'établir des scénarios de transition possibles, d'en évaluer la faisabilité technique et économique, et d'anticiper les éventuelles difficultés pour leur déploiement. **En particulier, les inventaires des matières et déchets pour les années 2016 et 2100 sont indiqués.**

⁶ Département d'études des réacteurs, Département de recherche sur les procédés pour la mine et le recyclage du combustible, Institut de technico-économie des systèmes nucléaires, Département de modélisation des systèmes et structures, Département des technologies nucléaires

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	12/90

Ces scénarios sont identiques en termes d'hypothèses et de chroniques aux scénarios prospectifs de l'édition 2018 de l'Inventaire National des matières et déchets radioactifs. Les résultats présentés ci-après concernent exclusivement le parc de production nucléaire français et pour des raisons de présentation simplifiée, ne visent pas à différencier les matières et déchets produits respectivement par le parc existant ou par les parcs futurs considérés dans cette étude.

Il est également rappelé qu'un premier jeu de conclusions a été rapporté en juin 2015 dans le cadre du *dossier 2015*⁷ remis par le CEA au Gouvernement au titre de l'arrêté du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions de l'édition 2013-2015 du PNGMDR. Le présent rapport s'inscrit dans la continuité de ces premières études. Signalons enfin que les conclusions présentées ci-dessous sont le fruit d'un travail collectif mené entre CEA, Orano, Framatome et EDF dans le cadre d'un programme d'études triennal devant s'achever fin 2018 et ont également été nourries de nombreux échanges avec l'Andra.

2. Vers une gestion durable des déchets et des matières : quelles options de cycle ? quels scénarios de transition possibles ?

2.1. Le parc actuel avec mono-recyclage

En France, le parc nucléaire actuel est associé à un cycle du combustible avec traitement et recyclage. Le traitement concerne les combustibles UOX usés et sépare l'uranium non consommé (uranium de retraitement - URT), le plutonium et les déchets comprenant les produits de fission et les actinides mineurs. Le recyclage concerne le plutonium ainsi séparé, qui est intégralement utilisé dans du combustible MOX ; il concerne aussi l'URT, qui peut être réutilisé en passant par les étapes de conversion et d'enrichissement (uranium réenrichi, URE). Ce cycle présente deux avantages majeurs :

- Le recyclage du plutonium permet une économie annuelle en uranium naturel d'environ 10 % à production électrique nucléaire donnée, économie qui peut atteindre un peu plus de 20% si l'uranium issu du traitement du combustible usé est lui-même recyclé⁸.
- Le traitement des combustibles UOX permet une réduction significative du volume et de la radiotoxicité à long terme des déchets finaux⁹ de haute activité et à vie longue (HA) par la séparation de ces déchets du reste du combustible des assemblages UOX usés. Le confinement de ces déchets ultimes dans des colis standardisés facilitent le développement d'un centre de stockage géologique optimisé.

⁷ Rapport CEA « Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides » remis au ministre chargé de l'énergie en juin 2015, en réponse au Décret n° 2013-1304 du 27 décembre 2013 pris pour application de l'article L. 542-1-2 du code de l'environnement et établissant les prescriptions du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs

⁸ Cela a été le cas dans les 4 tranches de Cruas jusqu'en 2013 avec certaines années environ 600 t/an d'URT recyclé. La reprise du recyclage de l'URT est prévue à l'horizon 2025

⁹ La radiotoxicité des assemblages MOX usés en attente de valorisation doit toutefois être considérée

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	13/90

2.2 L'intérêt de principe des réacteurs rapides

Les limites du cycle actuel tiennent au fait que les combustibles MOX et URE usés du cycle actuel sont quant à eux entreposés sous eau sans traitement pour valorisation. Il s'agit d'une disposition temporaire dans l'attente d'un traitement et d'un recyclage, qui pourront être implantés à l'échelle industrielle une fois les conditions techniques et économiques réunies ; les matières issues de ce traitement, l'uranium et le plutonium, seront alors recyclées dans des réacteurs à neutrons rapides, selon le schéma de référence envisagé en France. Le traitement des combustibles MOX et URE usés et le recyclage de la matière fissile instaureraient un véritable « cycle fermé ».

En l'état actuel du cycle français, 120 tonnes de combustibles MOX usés sont entreposées annuellement sous eau en toute sûreté. Les combustibles usés contiennent en tout environ 7 tonnes de plutonium non séparé.

Le cycle fermé ajouterait aux avantages du cycle actuel mentionnés plus hauts les avantages majeurs suivants :

- La valorisation du plutonium donne une perspective d'utilisation de cette matière, qui est une ressource énergétique essentielle s'il est associé à des réacteurs pouvant en tirer totalement profit. Les réacteurs du parc actuel ne peuvent le recycler qu'une seule fois avec le concept de MOX actuel (voir plus loin le chapitre sur le multi-recyclage du plutonium en REP).
- La perspective de « cycle fermé » permettrait de réduire significativement la dépendance à l'uranium naturel, déjà diminuée par le cycle actuel, par une valorisation durable des matières sortant aujourd'hui du cycle du combustible amont et aval (plutonium et uranium de retraitement, uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement de l'uranium naturel) ; dans une vision ultime, elle permet d'aller jusqu'à s'en affranchir.
- Enfin, comme pour le traitement des combustibles UOX usés, un gain supplémentaire sur le volume des déchets finaux à stocker serait associé à ce cycle.

Cependant, malgré l'intérêt technique du cycle fermé, ses avantages économiques n'apparaîtraient qu'à long terme, typiquement dans le cas d'une augmentation du prix de l'uranium dont l'horizon et l'amplitude restent aujourd'hui encore très incertains.

Les réacteurs à neutrons rapides présentent les caractéristiques techniques permettant de recycler le plutonium sans limitation et sans recours à l'uranium naturel enrichi et sont à même de remplir pleinement les objectifs du cycle fermé. Les réacteurs à eau, à neutrons thermiques, peuvent également recycler de manière récurrente le plutonium, mais ils nécessitent pour cela de l'uranium naturel enrichi et conduisent à une production accrue d'actinides mineurs.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	14/90

2.3 Les options de cycle avec RNR : une approche par paliers successifs

Description des paliers

Le rapport remis au Gouvernement français en juin 2015 au titre de l'arrêté du 27 décembre 2013 établissant les prescriptions de l'édition 2013-2015 du PNGMDR a souligné l'importance d'un déploiement progressif de RNR dans le parc de réacteurs et une introduction d'un nombre limité dans une première phase (typiquement à l'horizon de la moitié de ce siècle), en synergie avec les réacteurs à eau. Il a également été souligné l'importance de ne pas retarder le déclenchement de cette première phase afin de tester industriellement la technologie et son cycle avant un déploiement plus ambitieux par la suite. Le CEA, EDF, Orano et Framatome ont ainsi conjugué leurs efforts pour élaborer et définir des scénarios industriels de déploiement des RNR et en évaluer la performance technique et économique ainsi que le réalisme industriel (réacteurs et cycle).

Plutôt que d'envisager un remplacement à grande échelle des REP par des RNR, hypothèse considérée lors d'études précédentes (2012), il a été décidé d'étudier une approche plus graduelle avec un déploiement progressif qui tire parti des matières et des infrastructures existantes. Cette solution s'accommode mieux par ailleurs des progrès technologiques encore possibles sur les technologies RNR et leur cycle, et offre une flexibilité accrue en termes d'adaptations aux évolutions possibles de la politique énergétique française et des évolutions des conditions de marché.

Le déploiement de RNR est donc proposé par paliers successifs, chaque palier correspondant à :

- un objectif d'ambition croissante vers un nucléaire soutenable ;
- un nombre croissant de RNR dans le parc pour atteindre cet objectif.

Cette approche est résumée ci-dessous avec pour chaque palier les objectifs suivants :

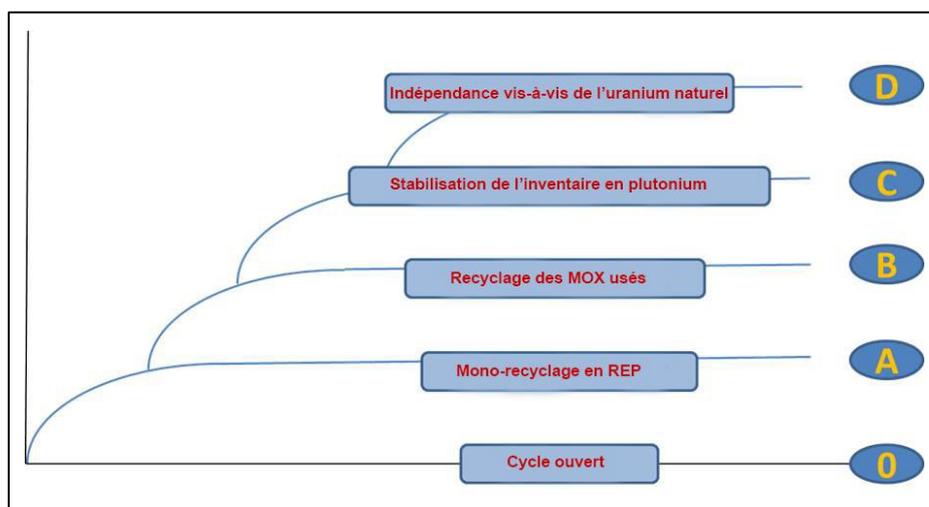


Figure 1 : approche progressive et par palier du déploiement des RNR

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	15/90

- palier A : Stabilisation des inventaires de combustibles UOx usés ; parc constitué exclusivement de réacteurs à eau (REP actuels puis renouvelés par des EPR) et pérennisation de la stratégie de mono-recyclage ;
- palier B : Stabilisation des inventaires d'UOx et de MOX usés ; recyclage des combustibles MOX REP usés dans des premiers réacteurs RNR (cycle dit aussi de bi-recyclage REP puis RNR), poursuite du recyclage des combustibles UOX usés en REP. Les réacteurs REP actuels sont renouvelés par des EPR. Les combustibles usés des RNR ne sont pas recyclés ;
- palier C : Stabilisation des inventaires de combustibles usés et de l'inventaire en plutonium dans le système électronucléaire français par la mise en œuvre du multi-recyclage des matières en RNR et en REP ;
- palier D : Indépendance vis à vis de la ressource uranium naturel. Parc constitué à 100% de RNR (option D1) ou hybride RNR/REP (option D2), avec multi-recyclage de l'ensemble des combustibles MOX RNR et/ou REP ;
- Palier 0 : Ce palier correspond à un parc hypothétique français qui n'aurait fonctionné qu'en cycle ouvert. Aucun traitement et a fortiori recyclage des matières uranium et plutonium ne serait mis en œuvre.

Ces paliers ont été caractérisés à l'aune de nombreux indicateurs et critères, et comparés entre eux. Parmi ces indicateurs, on citera tout particulièrement les indicateurs concernant les matières (flux annuels et inventaires), les déchets (flux annuels, nature et compositions, volumes et inventaires, emprise au stockage). Ce travail a déjà été réalisé et présenté dans le *dossier 2015* remis par le CEA à ses tutelles. Il a été poursuivi et réactualisé en 2017 en intégrant de nouvelles hypothèses sur l'évolution du parc et de son cycle, et en considérant également l'introduction du réacteur démonstrateur ASTRID-600 MW. Enfin des optimisations ont également été menées, notamment au palier C pour réduire la part de RNR dans le parc tout en respectant l'objectif du palier.

Les principales conclusions de l'analyse comparée et réactualisée de ces options de cycle sont présentées ci-après. Elles considèrent tout d'abord une approche « statique » (chapitre 3), à l'équilibre du palier, c'est-à-dire en considérant la pérennisation de ce dernier. Il s'agit ainsi de mettre en évidence les mérites mais aussi les détriments intrinsèques de ces différentes stratégies de cycle. Une approche dynamique (chapitre 4) a également été mise en œuvre. L'approche dynamique est très utile pour analyser les transitions par exemple ou disposer d'une estimation des inventaires avec le temps. Toutefois, comme pour l'approche statique, elle est sensible aux hypothèses prises sur l'évolution du parc et des usines du cycle. Elle est de plus sensible aux hypothèses liées aux transitions entre paliers (déclenchement, durées...). Les résultats de l'approche dynamique sont donc par construction très scénario-dépendants et agglomèrent de nombreux effets rendant les comparaisons parfois délicates ; ils doivent donc être utilisés avec précaution. Ils offrent cependant un éclairage utile sur l'évolution des besoins, par exemple en nouvelles infrastructures, et permettent d'anticiper les décisions.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	16/90

2.4 Le multi-recyclage des matières en REP

La question se pose de savoir s'il existe des solutions qui, sans remplir pleinement les objectifs du cycle fermé en RNR pour le plutonium et l'uranium, permettraient de constituer des solutions d'attente, ou intermédiaires, en cas de déploiement extrêmement différé de ces RNR. Ces solutions seraient une alternative pour valoriser les matières contenues dans les combustibles usés actuellement entreposés et seraient mises en œuvre dans des réacteurs à eau pressurisée proches des conceptions existantes de réacteurs.

L'objectif est ici d'assurer en continu une valorisation des matières nucléaires, donc de tous les combustibles usés, et de stabiliser dans la durée les inventaires de combustibles usés et de plutonium. Un autre objectif est de vérifier la capacité à déployer à terme une flotte de RNR, après une période de multi-recyclage en REP.

La question du multi-recyclage des matières en REP n'est pas nouvelle et a déjà fait l'objet d'études à partir des années 90. L'éventualité d'un déploiement différé des RNR, par rapport aux calendriers précédemment envisagés, change le contexte de ces études et en renouvelle l'intérêt. Concernant les REP, on observe à l'issue du mono-recyclage une dégradation de l'isotopie du plutonium (augmentation des isotopes pairs dans le MOX usé) qui impose d'augmenter la teneur en plutonium dans le combustible à recycler une seconde fois pour respecter le principe de réactivité identique. L'augmentation de la teneur en plutonium dans le combustible au-delà des teneurs autorisées aujourd'hui (12%), entraînerait toutefois des difficultés en termes de démonstration de sûreté, notamment en situation de vidange.

Cette limite contraint le système et empêche un second recyclage dans les réacteurs actuels autorisés pour les gestions MOX.

Pour y remédier, deux axes sont possibles :

- produire une partie de l'énergie à partir de ^{235}U en plus de ^{239}Pu , pour maîtriser l'augmentation de la teneur en plutonium ;
- durcir le spectre des neutrons pour fissionner les isotopes pairs tout en améliorant le taux de conversion, et ainsi diminuer la dégradation de l'isotopie du plutonium et ses impacts.

Parmi un certain nombre de solutions technologiques identifiées, deux ont été retenues pour ces axes et analysées : les concepts MIX et CORAIL d'une part et le concept de réacteur à haut facteur de conversion (HFC) d'autre part. Jugés plus accessibles industriellement, seuls les concepts MIX et CORAIL ont été caractérisés ici du point de vue de la gestion des matières et des déchets.

Réacteur à haut facteur de conversion

Pour tenter de concilier multi-recyclage du plutonium et économies d'uranium naturel, le concept de réacteur à eau à haut facteur de conversion (HFC) a été analysé. L'augmentation du facteur de conversion est obtenue en réduisant la proportion d'éléments modérateurs légers (dans ce cas l'eau),

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	17/90

ce qui diminue la dégradation de l'isotopie du plutonium au cours de l'irradiation, mais augmente l'inventaire en plutonium par MW.

Le concept REL-HFC a été étudié au sein de l'Institut Tripartite CEA-Framatome-EDF. Les scénarios d'introduction de REL-HFC dans le parc français de 63 GW montrent que l'inventaire en plutonium mobilisable en REL-HFC limite à ~16 GW la composante HFC du parc. Dans ces conditions, l'économie d'uranium naturel liée au seul recyclage du plutonium est de l'ordre 25 %, soit un peu plus du double que pour le mono-recyclage du plutonium pratiqué dans le parc actuel.

Il apparaît que la technologie des réacteurs à eau bouillante (REB), avec des facteurs de conversion plus élevés que pour les REP, serait la plus à même d'exploiter les avantages potentiels du concept ; mais ce choix constituerait une rupture forte avec les acquis techniques et industriels français.

Compte tenu de la réduction de la fraction d'eau en cœur, la mise en œuvre de cette technologie implique de développer un nouvel assemblage combustible avec un réseau plus serré et des modifications au niveau du réacteur. Si cette technologie permet dans son principe de mettre en œuvre le multi-recyclage du plutonium, l'économie sur la ressource uranium est à confirmer par les études de conception, mais reste dans tous les cas très limitée par rapport aux potentialités des RNR. Surtout, la conception et donc la faisabilité en termes de sûreté reste à démontrer. Elle conduirait à un renouvellement de la flotte et aux investissements correspondants (développement puis déploiement d'un nouveau type de réacteur), à des aménagements importants du cycle du combustible (fabrication, retraitement des assemblages et logistique plutonium), comme les autres options évoquées dans ce chapitre et comme dans le cas des RNR, ainsi qu'à une augmentation de la production d'actinides mineurs liée à un rapport capture/fission moins favorable que celui du RNR.

Concepts MIX et CORAIL

Le potentiel de concepts de multi-recyclage du plutonium en REP en attente d'un déploiement d'une filière RNR pour stabiliser l'inventaire Pu a été étudié. Deux concepts ont en particulier été retenus pour les études :

- Le concept MIX haute teneur (assemblage constitué de crayons de combustible MOX à support uranium enrichi). Le principe est de limiter la teneur en plutonium dans le combustible à une teneur proche de celle des MOX actuels et de compléter le besoin en noyaux fissiles par un apport d'uranium enrichi en support du combustible. Cet enrichissement sera d'autant plus important que la dégradation isotopique du plutonium sera grande et augmentera au fur et à mesure des recyclages, pour se stabiliser à une valeur comprise entre 3% et 4% d'²³⁵U. Le concept MIX est consommateur en plutonium, avec un bilan net compris entre -33 et -50 kg/TWh en fonction de la teneur en plutonium considérée (à comparer par exemple à -58 kg/TWh pour un réacteur EPR MOX 100%) ; dans les réacteurs chargés en MIX, de l'ordre de 55% du plutonium est consommé par fissions et produit de l'énergie, les 45% restants se transmutant en actinides mineurs.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	18/90

- Le concept CORAIL consiste à faire cohabiter au sein d'un même assemblage les crayons UOX et les crayons MOX à support en uranium appauvri. On notera par exemple la configuration 84 crayons MOX et 181 crayons UOX étudiée au début des années 2000 et retenue ici pour cette première étude de scénario (sous le nom « CORAIL-2000 »). L'enrichissement des crayons UOX est maximisé à 5%, la teneur en plutonium est alors adaptée pour compenser sa dégradation isotopique au fil des recyclages. La production de plutonium, excédentaire lors des premiers recyclages, décroît de l'ordre de +8 kg/TWh à une valeur légèrement négative rendant ce concept proche de l'iso-génération au-delà du 5-7^{ème} recyclage et jusqu'à l'équilibre.

2.5 Principaux indicateurs de caractérisation technique des options de cycle et des scénarios de transition :

De nombreux indicateurs de suivi de la performance technique des scénarios ont été estimés lors des études. Ne sont retenus ici que ceux directement en rapport avec les matières et les déchets radioactifs :

- composition du parc au cours du temps (fraction de REP, de RNR) et gestions de combustibles associées (distinction REP UOX et REP MOX par exemple)
- production électrique annuelle du parc nucléaire (TWh/an)
- consommation d'uranium naturel et production d'uranium appauvri (t/an)
- flux annuels pour la fabrication de combustibles neufs UOX (UNE et URE), MOX pour REP et MOX pour RNR (t/an)
- flux annuels pour le traitement des combustibles usés UOX (UNE et URE), MOX REP et MOX RNR (t¹⁰/an)
- inventaires des combustibles usés par type de combustibles UOX (UNE et URE), MOX REP et MOX RNR (t)
- inventaire en uranium de traitement (t)
- flux et inventaire en plutonium, en actinides mineurs dans le cycle, en réacteurs et dans les déchets (t/an et t)
- volumes et emprises au stockage des déchets HA et MA-VL ramenés à la production électrique (respectivement m³/TWh et m²/TWh)
- nombre de transports de combustible neuf et usé par an (n/an) et par type de combustible

2.6 Evolutions des hypothèses entre le « dossier 2015 » et les études menées en 2017-2018

Les hypothèses utilisées pour cette étude ont été discutées en 2016 puis figées début 2017. Il est important d'intégrer ce point compte tenu de l'évolution plus récente d'éléments de contexte tels que

¹⁰ Les tonnes de combustibles usés correspondent à des tonnes de métal lourd initial dans le combustible neuf avant irradiation ; par simplification, on utilisera la notion de tonnes (« t ») plutôt que « tml »

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	19/90

le redimensionnement en cours du programme ASTRID. Ce dernier point fait l'objet d'études en cours qui se poursuivront au-delà de l'année 2018.

Par rapport aux études de scénarios industriels diffusées dans le dossier remis par le CEA aux tutelles en 2015 dans le cadre du PNGMDR 2013-2015, la présente étude a pris en compte l'introduction du réacteur ASTRID-600 MW avec une divergence à la fin des années 2030, puis l'introduction des premiers réacteurs RNR commerciaux de 1000 MW 25 ans plus tard pour recycler le plutonium des combustibles MOX REP usés. Le déploiement du palier C (RNR sur-générateurs¹¹ avec multi-recyclage du plutonium) a été toutefois maintenu à l'horizon de la fin du siècle comme pour le *dossier 2015*. 2 réacteurs RNR intermédiaires 1450 MW initialement envisagés dans les années 2070 (tête de série du palier C et maintien du tissu industriel) ne sont plus considérés dans ces nouveaux scénarios compte tenu du décalage du palier B.

Pour ce qui relève de l'évolution du parc REP, les études ont pris en compte les hypothèses considérées actuellement par EDF pour son parc, à savoir un renouvellement du parc REP actuel (taux de charge moyen Kp de 78%) par des EPR (taux de charge moyen Kp de 83%). La durée d'exploitation des réacteurs actuels est proposée dans les scénarios entre 50 ans et 60 ans pour les REP 900 MW et considérée à 60 ans pour tous les autres, avec une production cible annuelle de l'ordre de 420 TWh. La simulation explicite des arrêts et démarrages de tranches a été introduite pour améliorer le réalisme industriel concernant notamment les approvisionnements en matières (uranium et plutonium) et la gestion des combustibles usés des cœurs mis à l'arrêt. Le recyclage de l'URT, interrompu en 2013, est supposé reprendre en 2025. La durée de vie des nouvelles usines du cycle est prise à 50 ans, avec un renouvellement des usines actuelles supposé ici en 2040. Les données réacteurs et performances des usines sont rappelées en annexe.

3. Evaluation de la performance technique des options de cycle du combustible (approche à l'équilibre)

3.1 Caractérisation des paliers comportant une part croissante de RNR

Les résultats de caractérisations des différentes options de cycle - ou paliers - sont présentés de manière synthétique dans le tableau 7. Le détail, palier par palier, est présenté ci-dessous.

Il est important de rappeler à ce stade que les paliers sont supposés à l'équilibre, ou prolongés de manière pérenne. Cela signifie par exemple que pour le palier A, le parc actuel est renouvelé par des EPR aux performances un peu supérieures aux réacteurs du parc actuel. Les valeurs indiquées peuvent

¹¹ Il est théoriquement possible de déployer un palier C avec des RNR iso-générateurs mais le parc bénéficie moins rapidement de la bonification de l'isotopie du plutonium, et il est alors nécessaire de déployer davantage de RNR iso-générateurs pour stabiliser l'inventaire total en plutonium

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	20/90

donc dans une certaine mesure différer des valeurs connues et caractéristiques du parc actuel en situation de mono-recyclage. Signalons enfin que le palier C a fait tout récemment l'objet d'une optimisation du nombre de RNR déployés dans le parc de façon à en minimiser la fraction et donc à diminuer le coût moyen du kWh.

3.1.1 Les matières

Le palier 0 : cycle ouvert

Ce palier correspond à un parc français hypothétique qui n'aurait fonctionné qu'en cycle ouvert : aucun traitement de combustibles usés et, a fortiori, aucun recyclage du Pu ou de l'U n'aurait été mis en œuvre.

Ce parc serait composé de 38 EPR UOX produisant environ 420 TWh/an pour une puissance installée de 58 GW (inférieure à celle du parc actuel (63,2 GW) du fait d'un facteur de charge des EPR plus élevé : 0,83 à comparer à 0,78 pour les REP actuels).

La consommation d'uranium naturel serait de 7500 t/an. La quantité de combustibles usés à entreposer ne cesserait d'augmenter à hauteur de 950 t/an ainsi que les inventaires plutonium et actinides mineurs (ici dans les combustibles usés) à hauteur respectivement de 9,9 t/an et 2,7 t/an.

Le palier A : Mono-recyclage U et Pu en REP

Objectif :

L'objectif de ce palier est de stabiliser les inventaires de combustible UOX utilisé en valorisant l'uranium et le plutonium contenus dans ces combustibles permettant de réaliser une économie de ressources naturelles. Les déchets ultimes produits lors des opérations de retraitement sont conditionnés pour leur stockage.

Principe de gestion des matières :

Les combustibles UOX sont traités au rythme de leur production par ordre chronologique (traitement en premier lieu des combustibles les plus refroidis) et la totalité du plutonium récupéré au traitement est recyclée sous forme de combustibles MOX au taux de 30% dans les réacteurs REP (REP 900 dans le parc actuel ou EPR dans les parcs futurs). Les combustibles MOX usés sont entreposés.

L'uranium récupéré au traitement (URT) est enrichi et recyclé sous forme de combustible URE dans des réacteurs EPR dédiés, avec l'objectif de recycler la totalité de l'URT produit (stabilisation de l'inventaire). Les combustibles URE usés sont entreposés.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	21/90

Les produits de fission, d'activation et les actinides mineurs (déchets HA) sont vitrifiés et conditionnés dans un colis de type CSD-V (Conteneur standard de déchets vitrifiés)¹².

Si le palier A est maintenu et pérennisé sans passage au palier suivant permettant leur valorisation, les combustibles usés MOX et URE peuvent être requalifiés en déchets alors destinés au stockage direct.

Composition du parc au palier A et principales caractéristiques :

Le parc caractéristique du palier A est constitué de 38 EPR produisant environ 420 TWh/an, correspondant à une capacité installée de 58,1 GW inférieure à celle du parc actuel (63,2 GW) du fait d'un facteur de charge des EPR plus élevé : 0,83 à comparer à 0,78 pour les REP. Elle se décompose de la façon suivante :

- 23 EPR UOX (35,2 GW)
- 11 EPR MOX (16,8 GW)
- 4 EPR URE (6,1 GW)

La mise en place du mono-recyclage de l'U et du Pu dans les EPR permet de réaliser une économie de 20% sur la consommation en uranium naturel par rapport au cycle ouvert.

Les quantités de combustibles usés MOX et URE entreposés augmentent de 180 t/an. Les quantités de combustibles usés UOX entreposés sont stabilisées.

L'inventaire de plutonium croît au rythme de 7,2 t/an (Pu essentiellement contenu dans les combustibles usés entreposés notamment combustibles usés MOX) à comparer à 9,9 t/an en cycle ouvert. Ainsi, du fait de la présence de gestions REP-MOX consommatrices de plutonium, l'inventaire plutonium au palier A est plus faible que celui du cycle ouvert (palier 0) mais en contrepartie, l'inventaire en actinides mineurs est plus élevé (augmentation de 3,3 t/an à comparer à 2,7 t/an pour le cycle ouvert).

Le palier B : stabilisation des MOX REP usés

Objectif :

L'objectif du palier B est de stabiliser l'entreposage des combustibles MOX REP usés. Pour cela il s'agit de recycler le Pu contenu dans les combustibles MOX usés en mettant en œuvre le nombre (limité) de RNR nécessaires à cette opération. Seuls les combustibles RNR ne sont pas traités. Le traitement des URE est une option qui n'a pas été considérée sur ce palier.

¹² L'estimation du nombre de colis vitrifiés prend en compte d'une part la teneur maximale en PF et actinides dans le verre (17,5%), et d'autre part la « borne alpha », limitant l'incorporation d'émetteurs alpha (pour limiter les dommages qu'ils pourraient provoquer dans le verre par auto-irradiation) ; la valeur limite de $2 \cdot 10^{19}$ désintégrations par seconde et par gramme de verre, cumulés à 10000 ans a été considérée ici.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	22/90

Principe de gestion des matières :

En complément des principes adoptés pour le palier A, les combustibles MOX REP usés sont recyclés. Les RNR sont alimentés uniquement par le plutonium issu du traitement de ces combustibles usés MOX et les combustibles RNR usés sont entreposés.

La puissance RNR nécessaire pour stabiliser l'entreposage MOX irradiés découle directement du flux de plutonium provenant du traitement de ces combustibles. Concernant la stratégie de traitement de ces combustibles, il a été retenu une chronologie de traitement proche d'un mélange de 50% de combustibles usés MOX chauds et 50% de combustibles usés MOX froids. Cette stratégie permet d'atténuer certaines difficultés pressenties dans les stratégies enveloppes : pour la stratégie « hot-first », une fraction de ^{238}Pu élevée (dépassant 4%), contraignante en termes de radioprotection et de thermique du cycle – pour la stratégie « cold first », une forte teneur en Pu ($\approx 30\%$) des combustibles RNR, conséquence de l'importante dégradation isotopique du Pu pendant l'entreposage.

Le palier B est une étape importante qui vise l'apprentissage du multi-recyclage du Pu à l'échelle industrielle. La fraction de RNR à implanter dans ce palier pour stabiliser les entreposages de combustibles usés MOX serait de 4,5% soit une paire de réacteurs 1000 MW et ASTRID-600 MW, suffisante pour apporter le retour d'expérience de la construction et de l'exploitation des RNR dans le cadre de la prise en main de la filière.

Le démonstrateur ASTRID-600 MW associé à 2 RNR 1000 MW pourrait contribuer à cet objectif de stabiliser l'inventaire en combustibles usés MOX REP.

Composition du parc au palier B et principales caractéristiques :

La capacité nette installée du palier B est de 57,6 GW se décomposant de la façon suivante :

- 22 REP UOX (33,6 GW)
- 10 EPR MOX (15,3 GW)
- 4 EPR URE (6,1 GW)
- 3 RNR (Astrid 600 MW + 2 RNR 1000 MW) (2,6 GW).

La consommation en uranium naturel s'établit à environ 5700 t/an contre 7500 t/an en cycle ouvert et 6000 t/an pour le palier A.

Les quantités de combustibles usés RNR et URE entreposés augmentent de 130 t/an.

L'augmentation de l'inventaire de plutonium au rythme de 6,8 t/an est très légèrement inférieure à celle du palier A. La grande majorité de cet inventaire se trouve dans les combustibles usés entreposés, notamment les combustibles RNR. La production d'actinides mineurs est par contre légèrement réduite par rapport au palier A : suppression d'un EPR MOX dans le parc du palier B, déploiement de quelques unités de RNR générant moins d'actinides mineurs. Comme pour le palier A, cet inventaire est essentiellement constitué d'Am (67% Am, 31% Np, 2% Cm).

Le palier B voit la mise en œuvre du traitement des combustibles usés MOX REP à hauteur de 75 t/an.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	23/90

Le palier C : stabilisation de l'inventaire Pu dans le système électronucléaire

Objectif :

Le palier C correspond à la mise en œuvre du multi-recyclage du plutonium dans un parc mixte REP et RNR avec l'objectif de stabiliser l'inventaire total en Pu. L'idée de base est de ne pas accumuler des quantités de plutonium au-delà des besoins nécessaires pour le déploiement de la filière RNR jusqu'à la fermeture complète du cycle (palier D).

Principe de gestion des matières :

Le palier C considère le traitement de tous les types de combustibles usés, en particulier les combustibles RNR. Le principe est de réduire à zéro le nombre de réacteurs REP chargés en UOX producteurs de plutonium et de compenser par des réacteurs REP chargés en MOX. Les réacteurs REP moxés ne peuvent toutefois multi-recycler le Pu en l'état en raison de la dégradation de sa composition isotopique au fil des recyclages. Les RNR sont alors envisagés pour redresser la qualité isotopique du Pu et permettre ainsi sa réutilisation dans les REP. Les RNR sont ici utilisés en mode surgénérateur ($GRG \approx 0,2$) pour accélérer la « bonification » du Pu.

Afin de simplifier le cycle, les flux de plutonium provenant du traitement des combustibles usés MOX et des combustibles usés RNR sont mélangés.

Ce palier comportant une proportion plus importante de RNR que le palier précédent, l'uranium récupéré du traitement des UOX (URT) est utilisé pour la fabrication de combustibles RNR. Sur ce palier, le parc ne comporte plus de gestion REP URE.

Composition du parc au palier C et principales caractéristiques :

Ce palier comporterait 26 REP et 12 RNR, l'ensemble produisant environ 420 TWh/an.

La capacité nette installée serait de 57,2 GW se décomposant de la manière suivante :

- 25 REP chargés à 30% en combustible MOX (38,2 GW)
- 1 REP chargés à 100% en combustible MOX (1,6 GW)
- 12 RNR 1450 MW (17,4 GW).

Soit 31% de RNR et 69% de REP

La proportion de combustible MOX dans les REP serait de 33% environ à l'échelle du parc. Les RNR permettent de « redresser » la composition isotopique du Pu au fil des recyclages. Ce « redressement » est plus performant par le déploiement de RNR surgénérateurs.

La consommation d'uranium naturel s'établit à 3400 t/an soit une réduction de 43% par rapport au palier A.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	24/90

Le principe de ce palier est de recycler tous les combustibles usés produits. Par conséquent, les entreposages sont stabilisés. L'inventaire en plutonium est également stabilisé puisque c'est également l'objectif de ce palier. L'inventaire en Pu utile¹³ est de 640 tonnes.

L'inventaire en actinides mineurs croît au rythme de 4,4 t/an (essentiellement de l'américium à hauteur de 77%). L'augmentation de la production annuelle par rapport aux paliers précédents (A et B) est liée au traitement des combustibles MOX REP plus fortement chargés en actinides mineurs.

Les paliers D1/D2 : indépendance vis-à-vis de l'approvisionnement en uranium naturel

Objectif :

Le palier D vise la fermeture complète du cycle, à savoir la suppression de tout besoin d'uranium naturel pour alimenter le parc et la stabilisation de l'inventaire en plutonium comme pour le palier C.

Principe de gestion des matières :

L'objectif d'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel impose que le combustible soit à base de plutonium (MOX REP ou MOX RNR). Sur ce palier, uranium et plutonium sont multi-recyclés jusqu'à la transformation complète de l'²³⁸U en ²³⁹Pu et jusqu'à la « combustion » complète du Pu. Celle-ci est compensée par un appoint en URT incluant celui de deuxième génération (uranium provenant du traitement des combustibles usés URE).

Deux options sont envisagées pour obtenir un parc globalement iso-générateur :

- Palier D1 : parc homogène 100% RNR
- Palier D2 : parc mixte composé de RNR surgénérateurs produisant le plutonium et de REP 100% MOX consommant le plutonium ainsi produit dans les RNR.

Composition du parc au palier D et principales caractéristiques :

Le palier D1 pourrait être composé de 41 RNR iso-générateurs correspondant à une puissance installée de 59 GW.

Le palier D2 pourrait être constitué de 28 RNR sur-générateurs (GRG ≈0,2) et de 10 REP chargés à 100% de MOX. La puissance installée serait alors de 56,3 GW.

¹³ Pu « utile » : constitué du Pu dans le stock incompressible de combustibles en entreposage en attente de traitement (stock déterminé par le temps de refroidissement minimal avant traitement, de l'ordre de 5 ans), du Pu en réacteur, et du Pu dans les en-cours des usines du cycle, strictement nécessaire pour produire chaque année 420 TWh. Le complément du Pu « utile » se trouve essentiellement dans le stock de combustibles usés entreposés plus de 5 ans. Ce sur-stock est lui-aussi traité, son seul effet est une augmentation du temps moyen de refroidissement des combustibles usés avant traitement, et n'est pas « utile » sur l'instant au fonctionnement du système et pourra être résorbé. Une autre partie du Pu restant se trouve pour une très faible part dans les déchets.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	25/90

Par construction, la consommation en uranium naturel est nulle. Les stocks de combustibles usés sont stabilisés.

L'inventaire en plutonium est stabilisé (≈ 1000 t pour l'inventaire Pu « utile »).

L'inventaire d'actinides mineurs pour l'option D1 croît à raison de 2,3 t/an contenues pour l'essentiel dans les déchets. Par comparaison avec les quantités indiquées pour les paliers précédents, cette valeur rappelle que le recyclage du plutonium en RNR conduit à une production significativement plus faible d'actinides mineurs (part de l'américium à hauteur de 63%). Pour l'option D2, l'inventaire en actinides mineurs serait plus élevé. Il croît de l'ordre de 3,4 t/an (part de l'américium à hauteur de 80%), compte-tenu de la proportion significative de REP-MOX.

3.1.2 Les déchets

La production des déchets a été estimée pour les paliers mettant en œuvre le déploiement progressif de la filière RNR (paliers B, C, D1 et D2) ainsi que les paliers correspondant au multi-recyclage du Pu en REP (MIX et CORAIL). Les volumes de déchets générés sont comparés à ceux produits par le palier A (poursuite du mono-recyclage, remplacement du parc actuel par des EPR) et par un cycle ouvert produisant la même quantité d'électricité.

L'ensemble du cycle est pris en compte dans les études en s'intéressant aux différentes catégories de déchets répertoriées dans la classification française. Les déchets liés au démantèlement des installations ne sont pas considérés ici.

Données utilisées pour l'évaluation

Déchets des opérations de conversion

Les résidus produits lors de la transformation des concentrés d'uranium en tétrafluorure d'uranium (UF₄), actuellement entreposés sur le site de production, ont été estimées à partir de données tirées du plan de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) 2013-2015.

Déchets de très faible activité (TFA) et de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC)

Ces déchets issus de l'exploitation des usines du cycle et des réacteurs, sont de natures diverses (métaux, tenues, gants, pièces électriques, filtres, ...) et sont aujourd'hui conditionnés dans des conteneurs de type divers (caissons de plusieurs m³, fûts de centaines de litres, ...).

Les ratios (m³ produits annuellement ou par réacteur) aujourd'hui observés pour ces déchets (issus de l'inventaire national ANDRA et des rapports annuels des INB), ont été reconduits et, dans certains cas, mis à jour par rapport au précédent dossier. C'est ainsi le cas pour les réacteurs (REP et RNR) afin de tenir compte de publications ou d'études plus récentes (inventaire national, études relatives au démonstrateur ASTRID).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	26/90

Déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)

Les déchets MA-VL sont constitués des structures métalliques des assemblages de combustibles usés qui sont séparées des matières nucléaires lors du traitement ainsi que des déchets d'exploitation provenant des réacteurs, des usines de traitement et de fabrication des combustibles MOX (déchets contaminés en émetteurs alpha). Les structures métalliques sont aujourd'hui compactées puis conditionnées en CSD-C (conteneur standard de déchets compactés) : ce mode de conditionnement a été reconduit dans les études. Certaines hypothèses ont évolué depuis le précédent dossier afin de tenir compte de données plus récentes, notamment celles relatives aux déchets MA-VL d'exploitation des usines de recyclage. Pour les déchets contaminés en émetteurs alpha produits lors de la fabrication des combustibles MOX, on a supposé la mise en œuvre du procédé de conditionnement par incinération/fusion/vitrification en cours d'étude au CEA¹⁴. Pour les déchets de fonctionnement produits au cours du traitement des combustibles usés, on a retenu la production actuelle qui constitue certainement une hypothèse majorante¹⁵.

Le tableau 3 présente les structures des assemblages de combustible, respectivement REP et RNR.

	EPR-UOX 51,8 GWj.t ⁻¹	EPR-MOX 53,5 GWj.t ⁻¹	RNR-MOX 72 GWj.t ⁻¹ Concept CFV-V4 ODS 1000 MWe
Structures (en kg/TWhe):			
-Tête, pied, gaines	712	700	1293
-Tube hexagonal	-	-	527
CSD-C / TWhe (m ³ / TWhe)	1,9 ¹⁶ (0,35)	1,9 (0,34)	4,1 (0,75)

Tableau 1 : Eléments de structure des combustibles

Nota : Par conception, les assemblages RNR comportent une plus grande quantité d'éléments de structures (notamment par la présence du tube hexagonal enserrant le faisceau d'aiguilles combustibles). Ramené à l'énergie produite par chaque type de combustible, le nombre de colis de déchets de structure produit s'avère plus important à l'issue du traitement de combustibles RNR que pour le traitement des combustibles REP. Certains autres déchets de structure des RNR (notamment les protections neutroniques supérieures, dépendant fortement de la conception du réacteur), ne sont pas considérés pour cette étude.

¹⁴On a considéré une production de 0,08 m³/t, correspondant à une réduction de volume de 7, soit un flux deux fois plus faible que dans les précédentes études qui supposaient la mise en œuvre d'un procédé de compactage non acceptable du point de vue de la sûreté du stockage.

¹⁵La production considérée est susceptible d'intégrer des déchets anciens et correspond aux technologies de procédé actuelles (elle ne tient pas compte des évolutions technologiques susceptibles de réduire le volume de déchets, comme la mise en œuvre du creuset froid pour l'étape de vitrification des solutions de produits de fission).

¹⁶ La production de déchets de structure d'assemblages EPR (UOX, MOX) est estimée en supposant un flux de 0,85 CSD-C par tonne de métal lourd initial (procédé de compactage).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	27/90

Il convient de rappeler toutefois que les colis MA-VL ne présentent pas un dégagement thermique important, et n'ont qu'une incidence limitée sur l'emprise du stockage (ils peuvent être gérés de façon compacte au sein des alvéoles de stockage, à la différence des déchets HA dont la thermicité conditionne pour l'essentiel l'emprise globale du stockage).

Déchets de haute activité (HA)

Les déchets HA comprennent les produits de fission et d'activation ainsi que les actinides mineurs qui sont formés au sein du combustible lors du séjour en réacteur. Ces éléments sont aujourd'hui vitrifiés et conditionnés dans un colis de type CSD-V (conteneur standard de déchets vitrifiés).

Le tableau 2 précise les quantités de produits de fission et d'actinides mineurs présents dans des combustibles mis en œuvre aujourd'hui (UOX, MOX) et attendues dans les RNR. L'estimation du nombre de colis de déchets vitrifiés prend en compte, d'une part, la teneur maximale en produits de fission et actinides dans le verre (fixée à 17,5 % massique) et, d'autre part, la « borne alpha » limitant l'incorporation d'émetteurs alpha (pour limiter les dommages qu'ils pourraient provoquer dans le verre par auto-irradiation) ; la valeur limite de 2.10^{19} désintégrations par seconde et par gramme de verre cumulées à 10 000 ans, a été considérée ici (hypothèse paraissant raisonnable compte-tenu des développements en cours). Cela est particulièrement important pour les verres issus du traitement de MOX REP et RNR, qui comportent des teneurs en éléments transuraniens plus élevées que les verres UOX.

Bilan net	EPR-UOX 51,8 GWj.t ⁻¹	EPR-MOX 53,5 GWj.t ⁻¹	RNR-MOX 72 GWj.t ⁻¹ Concept CFV-V4 ODS 1000 MW alimenté en Pu ex-UOX	RNR-MOX 72 GWj.t ⁻¹ Concept CFV-V4 ODS 1000 MW alimenté en Pu ex-MOX
Actinides mineurs total	3,3	17,1	7,3	9,6
Am – Np – Cm	1,5 – 1,6 – 0,2	13,8 – 0,5 – 2,8	6,3 – 0,5 – 0,5	8,3 – 0,5 – 0,8
²⁴¹ Am (en kg/TWh)	1,0	8,7	4,5	5,2
²⁴¹ Am (en kg/t)	0,4	4,0	3,2	3,8
PF (en kg/TWh)	120,2	116,7	102,9	102,9
Production ¹⁷ CSD-V / TWh (m ³ / TWh)	1,9 (0,35)	5,3 (0,95)	2,1 (0,4)	2,8 (0,5)

Tableau 2: Caractéristiques des combustibles refroidis 5 ans

¹⁷ L'estimation du nombre de CSD-V considère que les combustibles usés sont refroidis 5 ans avant d'être traités et que la solution de produits de fission est entreposée pendant une année avant d'être vitrifiée.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	28/90

Résultats d'évaluation des inventaires de déchets par palier :

Les évaluations des volumes de déchets pour les différents paliers sont comparées à celles d'un cycle ouvert et ramenées à l'énergie produite par l'ensemble du parc. Ces estimations constituent des ordres de grandeur préliminaires s'appuyant sur les informations actuellement disponibles concernant des déchets conditionnés ou non et pourront évoluer en fonction du retour d'expérience et de futures études.

Outre les caractéristiques des déchets figurent, pour chacun des paliers considérés, les quantités de combustibles usés sans emploi qui deviendraient *de facto* des déchets si l'on ne déployait pas les paliers suivants, à l'instar de ce que sont les combustibles UOX usés pour le cycle ouvert (palier 0) : ce sont les MOX et URE usés pour le palier A, les MOX-RNR et URE usés pour le palier B.

Pour les déchets HA, deux types d'informations sont indiqués : la première ligne (CP) précise le volume de déchets conditionnés en Colis Primaire (type CSD-V) et la seconde (CS), le volume de déchets en Conteneur de Stockage. Ces informations sont fournies à titre indicatif afin de mettre en lumière l'importance des volumes de déchets à l'issue du processus de conditionnement et pour l'entreposage avant la mise en stockage.

Le tableau 3 compare les estimations de déchets pour les options de multi-recyclage du plutonium en RNR avec celles du palier A et du cycle ouvert. Les bilans permettent de donner les tendances suivantes :

- Une diminution voire la suppression, pour les versions les plus abouties, des déchets produits par l'amont du cycle,
- Une stabilité des flux de déchets de type TFA et FMA-VC,
- Une réduction de la quantité de combustibles usés sans emploi, lesquels seraient à considérer comme des déchets HA dans le cas où il serait décidé de ne pas déployer les paliers suivants,
- Un accroissement des quantités de déchets MA-VL pouvant atteindre 50 à 60 % selon le palier D1 ou D2. Quasiment nulle pour le cycle ouvert, la production des déchets MA-VL, provenant essentiellement de l'usine de recyclage, augmente entre les paliers A et D1/D2 (de 0,89 m³/TWh pour A jusqu'à 1,37 - 1,46 m³/TWh pour les paliers D1 et D2) en raison de la part croissante des combustibles RNR à traiter et de l'importance des déchets de structure associés. Au cours du fonctionnement des RNR, leurs déchets d'exploitation sont supposés être d'abord conditionnés sans traitement complémentaire pour le démonstrateur ASTRID et les deux réacteurs RNR 1000 MW puis compactés au fur et à mesure du déploiement d'un grand nombre de RNR.
- Par ailleurs, les valeurs ont globalement augmenté par rapport au *dossier 2015* en raison essentiellement d'une actualisation des volumes de déchets d'exploitation provenant des usines de recyclage et des RNR,
- Une relative stabilité de la production de déchets HA vitrifiés pour les paliers A, B et D1 (parc composé uniquement de réacteurs à neutrons rapides). La quantité de produits de fission décroît en raison du meilleur rendement thermodynamique des RNR mais cela est contrebalancé par une production d'actinides mineurs qui reste plus élevée lorsque l'on met en œuvre des combustibles au plutonium (la valeur adoptée pour cette « borne alpha », deux fois plus élevée ici que la valeur actuelle, limite toutefois cette incidence).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	29/90

Les valeurs des paliers A et B sont légèrement plus faibles que dans le dossier 2015 en raison de l'évolution de certaines hypothèses, notamment celles relatives à la modélisation du fonctionnement du parc de réacteurs et aux chronologies de traitement des combustibles usés. Pour les paliers C et D2, la quantité de MOX traités s'est accrue (respectivement 27 % et 35 % du total traité). Elle se traduit par un accroissement de la quantité d'américium dans les déchets : la « borne alpha » devient alors contraignante et se traduit par une plus grande production de CSD-V avec un quasi-doublement. La quantité de produits de fission et d'activation (PFA) dans les colis produits par les paliers C et D2 s'en trouve fortement réduite avec des teneurs respectivement égales à 11,5 % et 12,60 %, nettement inférieures à celle de 17,5% obtenues pour les paliers A, B et D1.

		A	B	C	D2	D1	Cycle ouvert
Prod. Electrique	<i>TWh/an</i>	423	418	422	425	420	423
Résidus conversion	<i>m³/TWh</i>	14	14	8	0	0	18
TFA	<i>m³/TWh</i>	13	13	12	11	10	11
FMA-VC	<i>m³/TWh</i>	14	15	16	16	16	12
MA-VL	<i>m³/TWe¹⁸</i>	0,89	0,97-1*	1,25	1,46	1,37	0,07
HA	<i>m³/TWh</i>	0,26	0,29-0,29*	0,51	0,48	0,32	2,3 t/TWh 1,8 m ³ /TWh ¹⁹
	<i>m³/TWh²⁰</i>	0,63	0,71-0,71*	1,24	1,17	0,78	7,1 ²¹
Combustibles usés non mobilisés sur le palier (à valoriser dans palier suivant)	<i>t/TWh</i>	0,24 (URE) 0,20 (MOX)	0,23 (URE) 0,07 (RNR) sans traitement ASTRID 0,05 (RNR) avec	0	0	0	

¹⁸ Volume des colis de déchets en conditionnement primaire (hors conteneur de stockage et hors PNS).

¹⁹ Cette valeur est établie en considérant un conteneur primaire de forme cylindrique, des dimensions tirées du Dossier Argile 2005 pour un assemblage UOX long (diamètre étui de 33 cm, longueur de l'étui de 497 cm, masse du métal lourd de 535 kg par assemblage), un flux de 950 t/an pour une production électrique annuelle de 423 TWh.

²⁰ Volume des colis de déchets avec conteneur de stockage ou « surconteneur » (estimation selon « Dossier Argile ANDRA 2005 »)

²¹ On suppose la présence de 4 UOX dans le conteneur de stockage.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	30/90

			traitement ASTRID			
	m^3/TWh (CS)	0,74 (URE) 0,59 (MOX)	0,71 (URE) 0,47 (RNR) sans traitement ASTRID 0,32 (RNR) avec traitement ASTRID	0	0	0

*déchets sans traitement CU ASTRID – déchets avec traitement CU ASTRID

Tableau 3: Estimation de la production de déchets par catégorie pour différentes options de déploiement progressif de RNR, ramenée au TWh moyen produit par le parc entier

3.1.3 Les transports de combustible

L'évolution vers des options de recyclages de plus en plus poussées au fil du déploiement des paliers successifs, et l'introduction de nouveaux types de réacteurs et de combustibles dans le parc conduit à analyser la question des transports d'une part sous l'angle de la faisabilité technique (comment gérer au mieux les spécificités pouvant être soulevées par le transport des combustibles RNR ?) et d'autre part sous l'angle des volumes (comment gérer au mieux l'accroissement des flux de matières devant transiter entre réacteurs et installations du cycle ?).

Il est prématuré de chercher à apporter d'ores et déjà des réponses précises à ces questions, pour lesquelles les solutions technologiques pourront être développées ici aussi de façon progressive. Il nous est apparu toutefois intéressant de poser le cadre d'une telle réflexion, en termes d'ordres de grandeurs et d'identification des challenges techniques à adresser.

Cette approche a notamment été menée en lien avec Orano/TN. Pour chaque type de combustible, un emballage a été proposé sur la base de concepts actuels, et le nombre d'assemblages (neufs et usés) pouvant être transportés par emballage a été évalué dans le cadre de la réglementation française actuelle (ce qui constitue une incertitude pour des opérations envisagées au-delà de 2050), en tenant

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	31/90

compte des critères relatifs à la thermique, à l'exposition aux rayonnements ionisants, à la prévention du risque de criticité, à la masse maximale des emballages. Plusieurs conditions de transport ont été retenues : conditions de routine, normales (prise en compte d'incidents mineurs survenant parfois lors de manutentions, aspersion d'eau, ...) et accidentelles (incendie, immersion, collisions).

Signalons par ailleurs que ces études de scénarios d'évolution des parcs et des installations du cycle associées considèrent des usines de traitement et de fabrication intégrées, sans transport de plutonium séparé.

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de ces résultats en termes de ratio du nombre total de transport annuel d'assemblages neufs et usés.

	Palier A	Palier B	Palier C	Palier D2	Palier D1
Part de RNR dans le parc	0%	4,5%	31%	72%	100%
Nombre de transports d'assemblages par rapport au palier A (à solutions technologiques actuelles)	1	1,1	1,8	2,9	3,3

Tableau 4: Evaluation du nombre d'opérations de transport nécessaires dans les différents paliers par rapport au palier A

Le nombre de transports s'accroît avec la part de RNR dans le parc, ceci essentiellement lié aux critères relatifs à la criticité et, dans une moindre mesure, à la thermique des objets. Le nombre d'assemblages RNR pouvant être transportés par emballage est donc moindre par rapport au nombre d'assemblages REP. Cela pointe les objectifs de progrès et les besoins de recherche et d'innovation pour l'optimisation de cet aspect, qui constitue un enjeu important pour la mise en œuvre industrielle des réacteurs à neutrons rapides.

Ainsi, l'analyse suppose faisable un transport sous hélium des assemblages RNR neufs et considère comme admissible des températures maximales de gaines de l'ordre de 590°C. Des études de R&D sont nécessaires afin de valider cette donnée pour le matériau de gainage qui sera retenu.

Les études thermiques ont montré l'importance de la conductivité thermique du matériau composé constitutif des ailettes et de la résine sur le nombre d'assemblages transportables dans un emballage. Si certaines hypothèses étaient confirmées, le développement d'un matériau composé pour les emballages de combustibles usés, améliorant l'évacuation de la chaleur en conservant sa fonction de protection neutronique dans toutes conditions, devrait être envisagé.

En l'état actuel des études, le risque de criticité limite le nombre d'assemblages RNR susceptibles d'être transportés dans un emballage. Dans certains cas, un nouveau vecteur isotopique du plutonium, moins pénalisant que celui communément utilisé dans les démonstrations de sûreté, pourrait être utilisé avantageusement.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	32/90

En outre, une attention devra être portée lors de la conception à la limitation de la masse de l'emballage pour les combustibles RNR neufs afin de respecter les masses maximales réglementairement admissibles pour un transport routier. Plus généralement, le contexte réglementaire actuel a été considéré en dépit des incertitudes impossibles à évaluer pour des opérations envisagées à l'horizon 2040, voire au-delà.

Les études en cours notamment en lien avec Orano/TN sont néanmoins susceptibles de faire évoluer ces résultats.

3.1.4 Evaluations comparées des options (matières et déchets)

Les caractérisations menées confirment que l'évolution du palier A vers le palier D conduit à améliorer, à chacune des étapes, les grandeurs caractéristiques d'une gestion durable des matières, notamment la consommation en uranium naturel (économie de 5% supplémentaire par rapport au palier A à l'horizon du palier B et proche de 43% au palier C, puis totale au palier D). Les combustibles usés MOX REP et URE en entreposages sont recyclés et valorisés entraînant par la même occasion la stabilisation des inventaires de tous les combustibles usés, quelle que soit leur nature. Les déchets HA ultimes ne sont alors constitués que des colis de verre.

Ceci confirme l'intérêt d'une telle démarche progressive, qui permet par ailleurs d'améliorer à chaque palier la maturité industrielle des RNR et de son cycle associé, dont l'introduction dans la seconde moitié de ce siècle reste très modeste (voir en particulier le palier B avec moins de 5% seulement du parc en y incluant le réacteur ASTRID-600 MW). Ce palier B offre également un niveau de flexibilité intéressant dans la mesure où il rend disponible la technologie RNR, en cas de renchérissement de la ressource uranium ou de tout autre facteur externe amenant à déployer des RNR plus rapidement qu'initialement prévu.

Au-delà de ses fonctions d'expérimentations et de démonstrations, il a pu être montré que le réacteur ASTRID-600 MW désormais inclus dans ces études de scénarios peut être associé aux deux premiers RNR 1000 MW et contribuer à stabiliser l'inventaire en combustibles usés MOX REP. Cela conduit ainsi à l'économie d'un RNR 1000 MW en passant de 3 dans nos précédentes études à seulement 2 RNR 1000 MW.

L'évaluation des déchets produits à chacun des paliers confirme les avantages d'une politique de recyclage : le volume de déchets vitrifiés de haute activité et à vie longue (HA) reste au premier ordre constant sur l'ensemble des paliers, et nettement en-deçà du volume que représentent les combustibles usés dans une option de « cycle ouvert ». L'introduction de RNR conduit à une diminution des déchets d'exploitation - essentiellement faible activité (FA) et moyenne activité vie courte (MA-VC) - et à un accroissement du volume des déchets de structures de moyenne activité (MA-VL), dont l'emprise est nettement plus faible que celle des déchets HA dans la mesure où ces déchets ne dégagent pas de puissance thermique. Il est toutefois important de noter que dans le cas où l'on ne déploierait pas les paliers mettant en œuvre le multi-recyclage en RNR, les combustibles sans emploi immédiat (MOX-REP

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	33/90

et URE usés) deviendraient alors *de facto* des déchets qui viendraient s'ajouter à ceux qui sont considérés aujourd'hui.

L'évolution vers des paliers recyclant davantage conduit globalement à diminuer l'emprise globale du stockage géologique (conclusion du rapport 2015) confirmant les avantages d'une stratégie de recyclage progressif, palier par palier, jusqu'à la fermeture complète du cycle. L'évaluation des conséquences sur le stockage doit être toutefois affinée, notamment en prenant en compte les évolutions de concept envisagées par l'ANDRA. Une étude a été confiée à l'ANDRA pour réactualiser les emprises au stockage. Le critère thermo-hydro-mécanique (THM) pris en compte dans cette étude est plus contraignant que le critère en température de peau extérieure des colis considéré dans nos précédentes études. Ce critère est en effet plus sensible à la thermique moyen-long terme des déchets HA, comme typiquement celle liée à la décroissance de l'²⁴¹Am (432 ans de demi-vie) et donc à la présence de cet élément dans les colis de verres (ou dans le combustible usé en cas de non valorisation dans les paliers suivants). Les conclusions de cette étude sont données au chapitre 5 de ce rapport.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	34/90

	Palier A	Palier B (incluant Astrid-600)	Palier C (optimisé)	Palier D2 (symbiotique REP/RNR)	Palier D1 (100% RNR)	Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe RNR	0	4,5%	31%	73%	100%	0
Consommation Unat (t/an)	6000	5700	3400	0	0	7500
Production Uapp (t/an)	5200	4900	2700	-460	-130	6500
Production URApp (t/an)	800	750	0	0	0	0
Fabrication UOX (et URE), t/an	870 (dont 100 URE)	830 (dont 100 URE)	440	0	0	950
Fabrication MOX REP (t/an)	80	75	215	260	0	0
Fabrication MOX RNR : fissile et total (t/an)	0	18 et 30	100 et 200	230 et 470	330 et 480	0
Traitement UOX + URE, t/an	770	730	440	0	0	0
Traitement MOX REP (t/an)	0	75	215	260	0	0
Traitement MOX RNR fissile et total (t/an)	0	0	100 et 200	230 et 470	330 et 480	0
Flux de Pu dans le cycle (t/an)	9,2	11,3	48	75	73	0
Production nette de Pu (t/an)	7,2	6,8	0	0	0	9,9
Production AM (t/an) + répartition Np, Am, Cm	3,3 1,12 / 2,10 / 0,03	3,1 0,97 / 2,08 / 0,05	4,4 0,85 / 3,41 / 0,13	3,4 0,6 / 2,7 / 0,1	2,3 0,89 / 1,44 / -0,03 ²²	2,7 1,15 / 1,51 / 0,01
Production ²⁴¹ Am (t/an)	1,7	1,7	2,6	1,8	1,1	1,4
Déchets HA (m ³ de colis primaire/TWh)	0,26 CSD-V	0,29 CSD-V	0,51 CSD-V	0,48 CSD-V	0,32 CSD-V	1,8 ²³
Accroissement inventaire de comb. usés (t/an)	180	130	0	0	0	950
Déchets MAVL (m ³ /TWh)	0,89	0,97	1,25	1,46	1,37	0,07
Emprise au stockage zone HA CSD-V (m ² /TWh)	165	245-275	605	565	340	/
Emprise au stockage zone HA comb. usé (m ² /TWh)	<i>Etude à poursuivre</i>	<i>Etude à poursuivre</i>	0	0	0	<i>Etude à poursuivre</i>

Tableau 5 : Caractérisation des flux de matières et de déchets pour des options de cycle avec déploiement progressif des RNR et comparaison avec le cycle actuel mono-recyclage prolongé et le cycle ouvert

²² La production de Cm est négative compte tenu de sa disparition pendant les phases d'entreposage par décroissance alpha du ²⁴⁴Cm en ²⁴⁰Pu

²³ Cette valeur est établie en considérant un conteneur primaire de forme cylindrique, des dimensions tirées du Dossier Argile 2005 pour un assemblage UOX long, un flux de 950 t/an pour une production électrique annuelle de 420 TWh

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	35/90

3.2 Caractérisation du multi-recyclage en REP pour les concepts MIX et CORAIL

3.2.1 Les matières

Le concept MIX

Objectif :

Le concept MIX, assemblage constitué de crayons identiques en combustible MOX à support uranium enrichi, permet la mise en œuvre du multi-recyclage du plutonium dans un parc REP avec l'objectif de stabiliser l'inventaire en Pu. La totalité du cœur est constitué d'assemblages MIX.

Principe de gestion des matières :

Le principe du concept est de limiter la teneur du plutonium et de compléter le besoin en noyaux fissiles par un apport d'uranium enrichi en support du combustible. Cet enrichissement sera d'autant plus important que la dégradation isotopique du plutonium sera grande et augmentera au fur et à mesure des recyclages pour se stabiliser à une valeur comprise entre 3 et 4% du fait d'une stabilisation du vecteur isotopique Pu.

Ainsi il est possible avec ce concept de recycler au préalable le plutonium de faible qualité contenu dans les combustibles usés MOX des REP afin d'en résorber l'inventaire puis de déployer suffisamment de réacteurs MIX afin de stabiliser l'inventaire en plutonium du parc.

Il est également possible de gérer l'uranium de retraitement (URT) en déployant dans ce type de parc des gestions REP URE.

Composition du parc avec MIX et principales caractéristiques :

Pour stabiliser l'inventaire en plutonium, il faut pour cela que la consommation de Pu des réacteurs MIX soit égale à la production de Pu des réacteurs UOX. Cette condition est atteinte pour une composante MIX représentant environ un tiers de la puissance totale du parc (29% pour le MIX à 12% de teneur Pu ; 34% pour le MIX à 9,54% de teneur Pu ; 37% pour le MIX à 8% de teneur Pu).

Ainsi la composition du parc à l'équilibre pour le MIX à 9,54% en teneur Pu peut être la suivante :

- 25 REP UOX (38,2 GW)
- 13 REP MIX 9,54% Pu (20,8 GW).

Si on souhaite également recycler l'uranium sous forme d'URE, la composition du parc devient la suivante :

- 18 REP UOX (27,5 GW)

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	36/90

- 13 REP MIX 9,54% (20,8 GW)
- 7 REP URE (10,7 GW).

Le multi-recyclage en REP diminue d'un peu plus de 25% le besoin en uranium, comparé au cycle ouvert, lorsque le recyclage de l'URT est mis en œuvre. Sans ce recyclage URT, en raison des teneurs ^{235}U élevées dans les combustibles usés MIX, ce concept conduit à une économie de ressource moindre que pour le mono-recyclage actuel.

Le multi-recyclage en REP MIX stabilise les inventaires de combustibles usés (y compris MOX et URE) et de plutonium. L'inventaire Pu « utile » est ≈ 400 t alors que les scénarios de déploiement progressif de la filière RNR du *Dossier 2015* (palier C) approchent un inventaire « utile » de l'ordre de 700 t.

La dégradation isotopique du plutonium recyclé (diminution des isotopes impairs fissiles) étant essentiellement caractérisée par une augmentation marquée de la teneur isotopique du ^{242}Pu , la production d'actinides mineurs originaires de cet isotope (^{243}Am , ^{244}Cm et supérieurs) aura donc tendance à croître notablement au fur et à mesure des recyclages compte tenu des ratios capture/fission en REP. A l'équilibre d'un parc MIX avec gestion URE, de l'ordre de 55% du plutonium du combustible MIX est consommé par fission, les 45% complémentaires étant transformés en actinides mineurs par captures. Ainsi la production d'actinides mineurs (Np + Am + Cm) d'un tel parc est supérieure de l'ordre de 30% à celle d'un parc à recyclage unique du plutonium (Palier A) ou d'un parc avec RNR (+100% par rapport à D1, +30% par rapport à D2, similaire par rapport au palier C). Cela se traduit également par une augmentation du nombre de colis de verres produits, de l'ordre d'un facteur 2 avec les hypothèses de scénario considérées ici (avec en contrepartie le traitement de la totalité des combustibles usés, y compris MOX et URE, qui seraient sinon à stocker en couche géologique).

Le multi-recyclage en REP dégrade la qualité du plutonium (45% d'isotopes fissiles $^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$) actuellement gardé en ressource pour le démarrage de la filière RNR. Il présente une capacité à stabiliser l'inventaire plutonium à un niveau tel qu'un déploiement accéléré des RNR à puissance électronucléaire constante à l'horizon de la fin du siècle serait rendu délicat, et fortement ralenti selon les hypothèses de scénarios initialement retenues pour cette étude, par manque de ressource plutonium.

Le concept CORAIL

Objectif :

Tout comme le concept MIX, le concept CORAIL permet la mise en œuvre du multi-recyclage du plutonium dans un parc REP avec l'objectif de stabiliser l'inventaire en Pu. La totalité du cœur est constitué d'assemblages CORAIL. Plusieurs configurations d'assemblages ont été étudiées à la fin des

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	37/90

années 90 puis 2000 en faisant notamment varier le ratio entre le nombre de crayons MOX et le nombre de crayons UOX. Depuis 2017, une nouvelle configuration a été proposée et est en cours d'évaluation.

Principe de gestion des matières :

Le principe du concept étudié ici consiste à faire cohabiter au sein d'un même assemblage, les crayons UOX et les crayons MOX à support en uranium appauvri (comme par exemple 84 crayons MOX, 181 crayons UOX dans le concept étudié au début des années 2000), en plaçant ces derniers en périphérie. A l'inverse du concept MIX, l'enrichissement des crayons UOX est maximisé à 5%, la teneur en plutonium est alors adaptée pour compenser la dégradation isotopique du Pu au fur et à mesure des recyclages.

Le concept CORAIL-2000 a été retenu pour cette toute première étude de scénarios de multi-recyclage en REP. Il est proche de l'iso-génération et sera donc moins efficace que le concept MIX pour résorber au plus vite l'inventaire de combustibles usés MOX. Il conviendra alors d'équiper de l'ordre de 87% du parc avec des REP CORAIL-2000 pour stabiliser l'inventaire en plutonium, laissant peu de place au recyclage de l'URT par des gestions URE dans le parc sauf à considérer de l'uranium de retraitement pour les crayons UOX des assemblages CORAIL. Néanmoins des concepts alternatifs existent (configuration CORAIL-2000 à 120 voire 132 crayons MOX, configuration CORAIL-2017) et qui permettent le recyclage de l'URT grâce à une réduction du nombre des réacteurs à équiper.

Composition du parc avec CORAIL-2000 et principales caractéristiques :

Pour stabiliser l'inventaire en plutonium, la composition du parc à l'équilibre sera la suivante :

- 5 REP UOX (7,65 GWe)
- 33 REP CORAIL-2000 (50,5 GWe).

Tout comme le concept MIX, le concept CORAIL engendre un accroissement de la production d'actinides mineurs au fur et à mesure des recyclages, supérieure de 30% environ à celle d'un parc à recyclage unique du plutonium (Palier A) ou d'un parc avec RNR (+83% par rapport à D1, +23% par rapport à D2, -5% par rapport au palier C).

La consommation d'uranium naturel du parc CORAIL-2000 est de 6300 t/an. Elle reste plus faible que des parcs MIX sans gestions URE. Elle reste également plus faible que celle d'un palier A sans gestion URE. Elle est plus importante que dans le cas d'un parc MIX avec recyclage de l'URT.

Le multi-recyclage en REP-CORAIL stabilise les inventaires de combustibles usés (y compris MOX et URE) et de plutonium. L'inventaire en Pu « utile » peut être stabilisé en-dessous de 300 t alors que les scénarios de déploiement progressif de la filière RNR du *Dossier 2015* (palier C) nécessitent un inventaire « utile » de l'ordre de 700 t. Avec les hypothèses prises sur le rythme de déploiement de ces concepts, l'inventaire Pu se stabilise aux alentours de 600-700 tonnes.

Le multi-recyclage en REP-CORAIL dégrade la qualité du plutonium actuellement gardé en ressource pour le démarrage de la filière RNR. Il a la capacité à stabiliser l'inventaire plutonium à de l'ordre de 600-700 tonnes, niveau inférieur à la quantité requise pour démarrer de manière soutenue un parc

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	38/90

RNR de même puissance. Le démarrage d'une flotte complète de RNR à ce niveau de puissance nécessiterait alors la production de quantités supplémentaires de Pu, en REP ou dans les RNR, ce qui ralentirait le déploiement de ces réacteurs.

3.2.2 Les déchets

Le tableau 6 compare les estimations de déchets pour les options de multi-recyclage du plutonium en REP avec celles du palier A et du cycle ouvert. Les bilans permettent de donner les tendances suivantes :

- Sans recyclage de l'URT : une augmentation des déchets provenant de l'amont du cycle (conversion en UF₄) d'au plus 10 % entre le palier A et les options de multi-recyclage du plutonium en REP (sans gestion d'URE). En effet, ces dernières options nécessitent un recours plus important à l'uranium naturel générant proportionnellement plus de conversion. On peut noter que la mise en œuvre d'un recyclage d'uranium de retraitement (plus important pour le palier MIX 9,54 % avec gestion URE que pour le palier A) réduit les besoins en uranium naturel et donc les résidus de conversion (de l'ordre de 10 % par rapport au palier A).
- Avec recyclage de l'URT : des productions de déchets TFA et FMA-VC du même ordre de grandeur,
- Un accroissement de l'ordre de 20% des déchets de type MA-VL pour les options de multi-recyclage du plutonium en REP provenant des usines de recyclage. En effet, ces options nécessitent de fabriquer en plus grande quantité des combustibles MIX ou CORAIL contenant du plutonium que des combustibles MOX lors du palier A. La production de déchets contaminés en émetteurs alpha sera par voie de conséquence augmentée avec les hypothèses retenues sans préjuger d'évolutions technologiques. En outre, le traitement d'un plus grand nombre de combustibles usés générera plus de déchets d'exploitation selon l'approche considérée.
- Un doublement de la production des colis de déchets vitrifiés (HA) pour les options de multi-recyclage du plutonium en REP.
- Cette forte augmentation peut s'expliquer, pour ces scénarios, par une plus grande quantité d'actinides mineurs à vitrifier caractérisés par un nombre de désintégrations alpha cumulées (sur 10 000 ans) beaucoup plus important que pour le scénario A (quasiment 4 fois plus pour une tonne traitée). Cet accroissement provient du doublement de deux grandeurs : doublement, d'une part, de la quantité d'actinides mineurs par tonne traitée et, d'autre part, du nombre de désintégrations alpha cumulées par kg d'actinides mineurs qui est la conséquence de la présence notable de certains isotopes importants émetteurs alpha. Outre l'²⁴¹Am qui reste le radioisotope présentant le plus fort impact, il s'agit de l'²⁴³Am (produit par capture neutronique sur le ²⁴²Pu), du ²⁴⁴Cm et dans une moindre mesure du ²⁴⁵Cm (produits par capture neutronique sur l'²⁴³Am).

Cette configuration ne se traduit pas mécaniquement par 4 fois plus de colis de verre car, pour les scénarios de multi-recyclage du Pu en REP, la production des colis de déchets vitrifiés est limitée par la « borne alpha » alors qu'elle est limitée par la teneur en produits de fission et d'activation (égale à 17,5 %) pour le scénario A. Cette contrainte se traduit, dans un colis de

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	39/90

déchets vitrifiés, par deux fois plus de désintégrations alpha cumulées (sur 10 000 ans) par rapport au scénario A et au final par un flux annuel de colis doublé entre les deux stratégies de multi-recyclage.

En revanche, le multi-recyclage permet de valoriser tous les combustibles usés, qui sinon pourraient se trouver requalifiés en déchets.

		A	MIX 9,54 % URE	MIX 12 %	CORAIL	Cycle ouvert
Prod. Electrique	<i>TWh/an</i>	423	423	423	422	423
Résidus conversion	<i>m³/TWh</i>	14	13	16	15	18
TFA	<i>m³/TWh</i>	13	13	13	13	11
FMA-VC	<i>m³/TWh</i>	14	16	16	16	12
MA-VL	<i>m³/TWh²⁴</i>	0,89	1,11	1,10	1,10	0,07
HA	<i>m³/TWh (CP)</i>	0,26	0,52	0,54	0,52	2,3 t/TWh 1,8 m ³ /TWh ²⁵
	<i>m³/TWh²⁶ (CS)</i>	0,63	1,27	1,32	1,27	7,1 ²⁷
Combustibles usés non mobilisés sur le palier (à valoriser dans palier suivant)	<i>t/TWh</i>	0,24 (URE) 0,20 (MOX)	0	0	0	
	<i>m³/TWh (CS)</i>	0,74 (URE) 0,59 (MOX)	0	0	0	

Tableau 6: Estimation de la production de déchets pour différentes options de multirecyclage en REP, ramenée au TWh moyen produit par le parc entier

²⁴ Volume des colis de déchets en conditionnement primaire (hors conteneur de stockage et hors PNS).

²⁵ Cette valeur est établie en considérant un conteneur primaire de forme cylindrique, des dimensions tirées du Dossier Argile 2005 pour un assemblage UOX long (diamètre étui de 33 cm, longueur de l'étui de 497 cm, masse du métal lourd de 535 kg par assemblage), un flux de 950 t/an pour une production électrique annuelle de 423 TWh

²⁶ Volume des colis de déchets avec conteneur de stockage ou « surconteneur » (estimation selon « Dossier Argile ANDRA 2005 »)

²⁷ On suppose la présence de 4 UOX dans le conteneur de stockage.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	40/90

3.2.3 Evaluations comparées des options (matières et déchets)

Les éléments de comparaison des caractéristiques techniques des scénarios mettant en œuvre les concepts MIX et CORAIL-2000 sont rassemblés dans le tableau ci-dessous, avec les éléments du palier A, du palier D1 (100% RNR) et du palier 0.

	Palier A (sans gestion URE)	Palier A (avec gestion URE)	CORAIL (CORAIL-2000)	MIX 9.54% (avec gestion URE)	MIX 9.54% (sans gestion URE)	MIX 8% (sans gestion URE)	MIX 12% (sans gestion URE)	Palier D1 (100% RNR)		Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe MIX/CORAIL ou MOX RNR	0	0	87%	35%	35%	37%	29%	100%		0
Consommation Unat (t/an)	6800	6000	6300	5500	6900	7000	6700	0		7500
Production Uapp (t/an)	<i>Non estimé</i>	5200	5300	4700	<i>Non estimé</i>	<i>Non estimé</i>	5700	-130		6500
Production URTapp (t/an)		800	0	635			0	0		0
Fabrication UOX (et URE), t/an	865	870	125	630	630	600	680	0		950
Fabrication MOX REP (t/an)	90	80	0	0	0	0	0	0		0
Fabrication MIX/CORAIL REP (t/an)	0	0	830	325	325	350	275	0		0
Fabrication MOX RNR fissile et total (t/an)	0	0	0	0	0	0	0	330/480		0
Traitement UOX (et URE), t/an	865	770	125	630	630	600	680	0		0
Traitement MOX REP (t/an)	0	0	0 ⁽²⁸⁾	0 ⁽²⁸⁾	0 ⁽²⁸⁾	0 ⁽²⁸⁾	0 ⁽²⁸⁾	0 ⁽²⁸⁾		0
Traitement MIX/CORAIL REP (t/an)	0	0	830	325	325	350	275	0		0
Traitement MOX RNR fissile et total (t/an)	0	0	0	0	0	0	0	330/480		0

²⁸ Reprise possible des inventaires MOX usés, qui conduit sur une période transitoire au traitement des MOX usés produits au palier A

	DIFFUSION ORDINAIRE							CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0	
	Document Technique DEN							41/90	

Flux de Pu dans le cycle (t/an)	<i>Non estimé</i>	9,2	26	31	31	28	33	73	0
Production de Pu (t/an)	<i>Non estimé</i>	7,2	0	0	0	0	0	0	9,9
Production AM (t/an)	3,0	3,3	4,2	4,5	4,2	4,3	4,4	2,3	2,7
Avec répartition Np, Am, Cm	1,17 / 1,81 / 0,03	1,12 / 2,10 / 0,03	1,25 / 2,90 / 0,10	1,55 / 2,87 / 0,10	1,21 / 2,89 / 0,10	1,23 / 2,96 / 0,10	1,23 / 3,05 / 0,09	0,89 / 1,44 / -0,03	1,15 / 1,51 / 0,01
Production d' ²⁴¹ Am (t/an)	<i>Non estimé</i>	1,7	1,8	1,7	1,7	1,8	1,9	1,1	1,4
Déchets HA (m ³ de colis primaire/TWh)	<i>Non estimé</i>	0,26 CSD-V	0,52 CSD-V	0,52 CSD-V	<i>Non estimé</i>	<i>Non estimé</i>	0,54 CSD-V	0,32 CSD-V	1,8 ²⁹
Accroissement inventaire de comb. usés (t/an)	90	180	0	0	0	0	0	0	950
Déchets MAVL (m ³ /TWh)	<i>Non estimé</i>	0,89	1,10	1,11	<i>Non estimé</i>	<i>Non estimé</i>	1,10	1,37	0,07
Emprise au stockage zone HA CSD-V (m ² /TWh)	<i>Non estimé</i>	165	595	585	<i>Non estimé</i>	<i>Non estimé</i>	620	340	/
Emprise au stockage zone HA combustible usé si arrêt sans transition vers le palier suivant (m ² /TWh)	<i>Non estimé</i>	<i>Etude à poursuivre</i>	0	0	0	0	0	0	<i>Etude à poursuivre</i>

Tableau 7 : Caractérisation des flux de matières pour des options de cycle avec multi-recyclage en REP et comparaison avec le cycle actuel mono-recyclage prolongé, le cycle 100% RNR et le cycle ouvert

Moyennant l'introduction d'environ 30% de REP MIX dans le parc ou de 87% de REP CORAIL-2000, il a été montré qu'il était théoriquement possible de démarrer des parcs MIX ou CORAIL permettant un équilibre des flux en une quarantaine d'années et de résorber les inventaires de MOX et d'URE usés en un temps court, de l'ordre de 15 ans avec les hypothèses du scénario (ce qui suppose néanmoins de disposer sur cette période transitoire des capacités requises de traitement recyclage). Ces scénarios entraînent une quasi-stabilisation des inventaires de combustibles usés et de l'inventaire en plutonium, à un niveau compris entre 600 et 700 tonnes. Toutefois, ces hypothèses de scénario conduisent à des capacités de traitement recyclage requises en transitoire notablement supérieures aux capacités requises sur le long terme. De plus, les quantités stabilisées de plutonium et sa dégradation isotopique

²⁹ Cette valeur est établie en considérant un conteneur primaire de forme cylindrique, des dimensions tirées du Dossier Argile 2005 pour un assemblage UOX long, un flux de 950 t/an pour une production électrique annuelle de 420 TWh

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	42/90

ne permettent pas une transition soutenue, dans les hypothèses du scénario étudié, vers un parc fortement constitué de RNR. Les scénarios de transition doivent donc être optimisés du point de vue des besoins de capacité en traitement recyclage d'une part et de la masse de plutonium à préserver pour le déploiement ultérieur des RNR d'autre part.

Ces concepts permettent une économie sur la ressource uranium pouvant atteindre de l'ordre de 10% supplémentaire comparé au mono-recyclage actuel (pour un total supérieur à 25%, comparé au cycle ouvert), dans la configuration d'une mise en œuvre du recyclage de l'uranium de traitement. La stabilisation des inventaires d'URT et d'URE usés est alors possible dans un parc équipé de REP MIX grâce au déploiement de gestions REP URE dans les réacteurs non mixés et au recyclage des URE usés.

Dans le cas de scénarios sans recyclage de l'uranium, les études montrent une consommation en uranium naturel qui peut être soit légèrement supérieure (cas des MIX 8% et 9,54%), soit légèrement inférieure (cas du CORAIL-2000) à celle d'un cycle de type mono-recyclage actuel supposé sans gestion URE. Ceci est dû à la quantité élevée de l'URT laissé sans recyclage dans ces hypothèses.

Du point de vue de la mise en œuvre industrielle, ces concepts sont intéressants de par leur compatibilité avec la technologie REP. Les premières évaluations réalisées sur les réacteurs de type EPR n'ont pas mis en évidence de points bloquants. Pour ce qui est des conceptions détaillées dans cette analyse, ces concepts doivent toutefois encore faire l'objet d'expertises plus approfondies avant de valider ces conclusions :

- Sur les aspects réacteur, les études de vidange et de comportement en configurations accidentelles restent préliminaires et ont été menées sur des cœurs à l'équilibre. Il s'agira en outre de démontrer la réversibilité entre ces assemblages et des assemblages UOX à l'uranium naturel en cas de difficulté d'approvisionnement des combustibles issus du recyclage, et enfin la compatibilité des chaudières avec la variabilité importante en teneur uranium et/ou vecteur plutonium. A noter que des solutions sont étudiées actuellement pour pallier ces difficultés. A titre d'exemple, pour le concept type CORAIL, elles devraient pouvoir répondre à l'exigence de réversibilité. Des solutions au travers de gestions spécifiques sont disponibles pour le MIX ;
- Sur les aspects usines du cycle, les études montrent une adaptation nécessaire du tissu industriel, principalement pour les opérations de fabrication du combustible dans le cas du MIX, ainsi qu'un triplement des flux annuels de combustibles au plutonium à traiter et à recycler par rapport au cycle mono-recyclage (à mettre toutefois en perspective avec le décuplement des flux Pu dans le cadre de la mise en œuvre des RNR). La contrainte très volontariste utilisée dans le scénario et qui vise à résorber les inventaires de MOX REP usés en 15 ans conduit de façon transitoire au traitement de l'ordre de 400 t/an de MOX REP usés, flux jugé inutilement élevé du point de vue de la faisabilité industrielle. Le scénario devra être optimisé ou revu à cet égard en détendant le critère de durée de reprise des MOX usés. Le concept CORAIL présente un avantage par rapport au MIX en termes de compatibilité avec les technologies actuelles des usines du cycle, en particulier au niveau de la fabrication, mais la part du parc en gestion CORAIL

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	43/90

reste très importante et voisine de 90% avec le concept choisi dans le scénario étudié (CORAIL-2000), et cela augmente sensiblement le flux à traiter de combustibles au plutonium.

Les concepts MIX/CORAIL induisent une augmentation de la production d'actinides mineurs dans l'ensemble du système réacteurs, usines du cycle, entreposages (de l'ordre de +30% dans le scénario étudié, par rapport au mono-recyclage, ou encore de +100% par rapport à un parc 100% RNR). Cet accroissement est imputable principalement à la production accrue d'²⁴³Am (par capture sur le ²⁴²Pu) et de ²⁴⁴Cm dans le combustible MIX par rapport à un combustible UOx. La production annuelle totale d'²⁴¹Am reste quant à elle similaire à l'échelle du parc (de l'ordre de 1,7 t/an) dans les deux cas. Au palier A, près des deux tiers des actinides mineurs sont en effet contenus dans les combustibles usés MOx en entreposage. Seuls de l'ordre de 40% de l'inventaire total des actinides mineurs est incorporé dans les colis de verre à l'issue du traitement des combustibles usés UOx alors que l'intégralité de ces actinides mineurs est acheminée vers les colis de verre dans le cas du multi-recyclage en REP. Le flux d'actinides mineurs et en particulier d'²⁴¹Am incorporés dans les colis de verre augmente d'un facteur proche de 2,5 dans le cas du multi-recyclage en REP (cas du MIX 9,54%, avec gestion URE par exemple) comparé au palier A. Selon le critère physique atteint pour la production annuelle de verres au palier A (teneur max en PFA dans le verre), ou lors de la mise en œuvre du multi-recyclage en REP (limite max « alpha » compte tenu des quantités accrues d'émetteurs alpha), le multi-recyclage du plutonium en REP induit au final une production annuelle de conteneurs de verres augmentée d'un facteur proche de 2 avec les hypothèses du scénario considéré. Par ailleurs, cela conduira à une augmentation de l'emprise au stockage des colis de verres par rapport au mono-recyclage, celle-ci étant d'autant plus marquée que l'évolution récente des critères de dimensionnement des sites argilites indiquent une plus forte sensibilité à la thermique moyen-long terme, directement liée aux quantités d'²⁴¹Am (demi-vie 432 ans).

L'évaluation du nombre de transports de combustibles neufs et usés est en cours et devrait être disponible à partir de fin 2018.

En conclusion, ces options de multi-recyclage en REP permettent de stabiliser les inventaires en plutonium et en combustibles usés en entreposage (UOX, MOX et URE) avec des technologies qui semblent accessibles vu d'aujourd'hui. Elles permettent de traiter la totalité des combustibles usés qui, en l'absence de valorisation seraient à considérer comme déchets. En revanche, elles conduisent à une production d'actinides mineurs et de déchets conditionnés supérieure à celle obtenue avec les RNR (de l'ordre de 4 à 4,5 t/an d'actinides mineurs pour le multi-recyclage en REP contre de l'ordre de 2,3 t/an pour un parc 100% RNR, 0,52 m³/TWh de colis de verre pour le multi-recyclage en REP et 0,32 m³/TWh en parc 100% RNR). Elles diminuent de plus de 25% le besoin en ressources uranium, comparé au cycle ouvert (5500 t/an contre 7500 t/an en cycle ouvert) à condition de mettre également en œuvre le recyclage de l'uranium de retraitement. Cela reste cependant loin des performances atteignables avec les RNR (0 t/an). Pour ces raisons, elles ne sauraient donc se substituer aux RNR. Il s'agit d'une solution intermédiaire, permettant de stabiliser les inventaires tout en différant les investissements nécessaires pour une flotte commerciale de RNR. Déployées au rythme envisagé dans les premiers scénarios étudiés, elles conduisent à stabiliser les inventaires de plutonium à une quantité insuffisante (600-700 tonnes,

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	44/90

cf. chapitre 4) pour un déploiement ultérieur et soutenu de RNR. Si les réacteurs restent sur une technologie de type REP, des investissements importants sont à prévoir dans les usines du cycle intermédiaires, tant en terme de coûts que de technologies à déployer, intermédiaires entre le mono-recyclage et les futures usines du cycle RNR. De nouvelles installations du cycle seraient nécessaires pour une mise en œuvre à l'échelle du parc installé.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	45/90

4. Evaluation de la performance technique des scénarios de transition (approche dynamique)

4.1. Scénarios de transition retenus pour l'étude

Après la caractérisation intrinsèque de chacun des paliers considérés à l'équilibre (approche dite statique rapportée au chapitre 3), il s'agit ici essentiellement d'évaluer la faisabilité technique et le réalisme industriel des différentes trajectoires envisagées pour aboutir à des scénarios d'évolution globaux du parc de réacteurs et des usines du cycle, enchaînant différentes phases ou paliers.

Trois familles de scénarios de transition sont retenues et comparées³⁰. Dans tous les cas, la situation de départ est la situation actuelle à savoir le mono-recyclage du Pu en REP (Palier A).

- Les scénarios de déploiement progressif des RNR
 - **Le scénario ABCD1** qui envisage la succession des paliers A (mono-recyclage du Pu en REP), B (stabilisation des MOX REP usés par leur recyclage dans quelques unités de RNR), C (stabilisation de l'inventaire Pu via un parc symbiotique REP-RNR) puis D1 (parc 100% RNR) ;
 - **Le scénario ABCD2** qui envisage comme situation finale un parc hybride constitué de RNR et de REP moxés à 100% ;
 - **Le scénario ABD2** alternatif au scénario ABCD2 dans lequel le déploiement vers le palier D2 est accéléré (scénario motivé par exemple par un renchérissement rapide de la ressource $U_{nat.}$, voire par sa pénurie).
- Les scénarios de déploiement du multi-recyclage du Pu en REP
 - **Les scénarios mettant en œuvre le concept MIX** pour multi-recycler le Pu jusqu'à obtenir la stabilisation de son inventaire total. Trois variantes sont retenues selon la teneur Pu admissible dans le combustible : 8%, 9,54%³¹ et 12%. Un scénario MIX avec recyclage de l'URT sous forme de gestions REP URE est également étudié.
 - **Le scénario mettant en œuvre le concept CORAIL** pour multi-recycler le Pu jusqu'à obtenir la stabilisation de l'inventaire Pu.
- Le scénario de non renouvellement du parc
Ce scénario ne prévoit pas le renouvellement des réacteurs actuels qui sont arrêtés à la visite décennale numéro 4 (VD4).

³⁰ La gestion des combustibles Phénix et Super Phénix et des rebuts MOX n'est pas prise en compte dans ces simulations.

³¹ La teneur Pu de 9,54% correspond à la « parité MOX » demandée par EDF à l'Autorité de Sûreté Nucléaire. Le dossier a finalement été accepté à une teneur de 9,08% car suffisante pour les gestions MOX des prochaines années.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	46/90

Mis à part celui du multi-recyclage en REP, ces scénarios sont équivalents à ceux évalués dans le cadre de l'Inventaire National 2018 (IN2018) relatif à l'article 2 du PNGMDR. Cependant, les estimations des quantités de matières et de déchets rapportées dans ce rapport concernent non seulement les installations actuelles mais aussi futures venant en remplacement des capacités actuelles. Les déclarations rapportées au titre de l'IN2018 sont les valeurs calculées par les détenteurs et portent sur les substances radioactives produites et à produire par les installations autorisées à fin 2016 (parc existant et Flamanville 3).

4.2. Evaluation des scénarios de déploiement progressif des RNR

4.2.1 Description des transitions

Transition du palier A vers le palier B

La transition de A vers B correspond à la mise en œuvre du traitement des combustibles usés MOX REP et au déploiement des premières unités RNR pour utiliser le plutonium issu de ce traitement.

Le déclenchement du palier B n'est pas formellement imposé par une contrainte externe, comme une échéance réglementaire ou la nécessité absolue de traiter un stock de matière. En particulier, il n'apparaît pas de limite identifiée à la durée d'entreposage sous eau des combustibles MOX. En effet, dès lors que les assemblages combustibles sont conservés à température basse dans une eau dont la chimie est contrôlée, les mécanismes pouvant conduire à une rupture de gaine sont soit inactivés (fluage, corrosion sous contrainte) soit extrêmement lents (corrosion généralisée ou corrosion par piqûres). La fragilisation induite par la présence d'hydrures radiaux est régie par les conditions de température rencontrées avant la phase d'entreposage (transport) et ne dépend pas de la durée de l'entreposage³².

Il peut néanmoins exister des motivations pour enclencher le palier B à une échéance qui ne soit pas trop éloignée :

- Le multi-recyclage du plutonium représentant la solution apportée à la question de la durabilité des systèmes nucléaires (préservation des ressources, gestion des matières et des déchets), la démonstration industrielle de cette stratégie se doit d'être apportée sans trop tarder ;
- Le maintien des compétences industrielles et de R&D au sein de la filière RNR française et du cycle du combustible nécessite de ne pas introduire d'interruption prolongée entre les dernières réalisations (Superphénix) et le déploiement des premières unités commerciales. Le maintien d'un tissu industriel, de compétences d'ingénierie et de R&D, ne peut se faire qu'au travers d'un programme de réalisations continu, matérialisé notamment par la réalisation préalable de réacteurs technologiques ou de démonstration et d'installations du cycle associées.

³² « L'entreposage des combustibles MOX usés », présentation CEA (C. Cappelaere) à l'audition par la CNE2 du 23/02/2017 ; Dossier EDF « Impact cycle »

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	47/90

Ces éléments plaident pour démarrer le palier B dès que les conditions techniques le permettront, c'est-à-dire dès la disponibilité des premiers modèles industriels de la filière RNR-Na. Le groupe de travail quadri-partite CEA, EDF, ORANO, FRAMATOME chargé d'instruire les questions de faisabilité industrielle a situé le démarrage des RNR commerciaux 25 ans après la mise en service industrielle d'Astrid-600 MW (supposée en 2039 dans cette étude), soit au milieu des années 60. Cet horizon de temps tient compte du besoin d'un retour d'expérience suffisant sur le fonctionnement d'Astrid et de délais réalistes pour les actions techniques et réglementaires. L'option de référence retenue consiste à faire directement participer Astrid à l'objectif de stabilisation des combustibles usés MOX au palier B. Dans ce cas, en plus du démonstrateur, le palier B suppose le déploiement de 2 RNR. Ceux-ci sont appairés permettant de réaliser des économies supplémentaires sur le coût de ces 2 réacteurs.

Une augmentation progressive de la puissance des réacteurs a été préconisée, ce qui correspond d'ailleurs à une démarche industrielle classique en France. Pour les réacteurs du palier B, la puissance unitaire retenue est de 1000 MW, intermédiaire entre Astrid-600 MW et le réacteur de série actuellement envisagé à 1450 MW.

Outre le déploiement des premiers RNR, le palier B se caractérise par des fonctionnalités nouvelles pour les usines du cycle : un traitement conséquent de combustibles MOX (de l'ordre de 75 t/an en régime établi, sans mélange des matières U et Pu avec celles issues des combustibles UOX) et la fabrication de combustibles RNR à hauteur de 30 t/an dont 18 t/an de combustibles fissiles. La mise en œuvre des opérations de traitement-recyclage doit anticiper le démarrage du premier RNR de quelques années pour disposer de suffisamment de Pu issu de MOX usé et est envisagé à l'horizon de 2052 dans nos études. Le besoin de ces nouvelles fonctionnalités du cycle coïncide avec le besoin de remplacement des installations actuelles supposé en 2040 pour la présente étude.

Transition du palier B vers le palier C

L'enclenchement du palier C est marqué par la mise en œuvre du traitement des combustibles RNR usés des premières unités commerciales déployées au palier B et par le déploiement de RNR supplémentaires pour recycler le plutonium ainsi récupéré. Il a été retenu dans l'étude d'enclencher le palier à l'horizon 2090, date correspondant à un créneau de déploiement de nouveaux réacteurs et coïncidant avec le renouvellement des installations du cycle dont la durée de vie est supposée de 50 ans dans cette étude. A partir du palier C, les RNR construits auront une puissance unitaire de 1450 MW. Néanmoins, l'étude considère la mise en service de la tête de série à l'horizon 2085 soit une vingtaine d'années après le premier RNR 1000 MW afin de se réserver la possibilité d'un déploiement massif de RNR 1450 MW par paires dès le début du palier C.

Avant le démarrage du palier C, il paraît raisonnable d'envisager le traitement anticipé de combustibles usés RNR à petite échelle afin d'acquérir suffisamment de retour d'expérience en vue de l'usine dimensionnée pour le palier C (de l'ordre de 200 t/an). Ainsi à l'horizon 2070, les premiers combustibles d'Astrid sont traités afin d'alimenter partiellement cette ligne de traitement en Pu ex-RNR à hauteur de 15 t/an de combustible. Le plutonium provenant d'Astrid est toutefois mélangé à du Pu issu de

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	48/90

combustible REP MOX usé provenant du traitement de 20 t/an de combustible usé REP MOX afin de permettre au démonstrateur de continuer à participer à la stabilisation de l'inventaire des combustibles usés REP MOX (palier B) tout en apportant les éléments de démonstration du recyclage de son propre combustible usé.

Transition du palier C vers le palier D

La transition du palier C vers le palier D1 (100% RNR) consiste à substituer des RNR isogénérateurs aux REP arrivant en fin de vie et à rendre le système global strictement isogénérateur dès que le plutonium nécessaire au fonctionnement du parc a été récupéré (plutonium dit « utile »).

Cette transition devra naturellement s'opérer pendant un créneau de renouvellement du parc de façon à exploiter les REP jusqu'à leur fin de vie et à ne pas transgresser l'hypothèse de production électrique constante. Ces études de scénarios envisagent donc cette transition entre 2150 et 2180. Ce n'est donc qu'à cette échéance avec la mise à l'arrêt des derniers REP que disparaîtra le besoin d'uranium naturel (et plus généralement des opérations de l'amont du cycle, extraction uranium naturel, conversion, enrichissement, fabrication de combustible UOx).

La transition du palier C vers le palier D2 (parc hybride REP-RNR) s'opère aux mêmes dates que pour le palier D1.

Transition anticipée du palier B vers le palier D

Le moteur essentiel de la transition vers le palier D est lié à des questions de disponibilité ou de prix de la ressource uranium naturel. Il est difficile aujourd'hui d'avoir une estimation précise de la date à laquelle l'évolution du prix de l'uranium justifie de devoir disposer d'un parc de réacteurs qui ne consomme plus d'uranium naturel.

L'approche adoptée ici consiste à chercher à estimer au mieux le moment où une telle éventualité pourrait se produire et voir si cette échéance est compatible avec la mise en place d'un parc majoritairement ou tout RNR.

L'enchaînement successif des différents paliers caractérisés dans le chapitre 3 conduit à atteindre l'objectif d'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel à un horizon très éloigné, situé dans la seconde moitié du XXI^e siècle. Or, certaines analyses³³ basées sur des hypothèses d'une demande nucléaire soutenue au niveau mondial, concluent à des tensions sur les prix de l'uranium se produisant à l'horizon de la fin du siècle actuel ce qui se manifeste notamment par des RNR devenant plus compétitifs que des REP. A titre de précaution, il a semblé nécessaire d'étudier une transition anticipée vers le palier D, transition qui court-circuiterait tout ou partie des paliers précédents.

³³ Monnet, A., 2016. Disponibilité à long terme des ressources mondiales d'uranium. Université de Montpellier (Thèse) ; Monnet, A., Gabriel, S., Percebois, J., 2017c. Ressources mondiales d'uranium : quelle disponibilité à long terme ? ; La Revue de l'Énergie pp.37-56

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	49/90

Le scénario étudié ici suppose qu'une pénurie d'uranium se fasse jour dans la deuxième moitié du siècle incitant à déployer au plus tôt un parc type D2 par exemple (MOX REP et RNR). L'hypothèse de ne pas arrêter prématurément un réacteur en service tout en plafonnant la puissance installée ayant été conservée³⁴, ce n'est qu'à partir de 2090 (début du 2^{ème} créneau de renouvellement du parc) que les REP arrivés en fin de vie sont arrêtés et remplacés par des RNR.

L'évolution dans le temps de la composition du parc pour les 3 scénarios de transition ABCD1, ABCD2 et ABD2 est présentée sur les figures 2, 3 et 4.

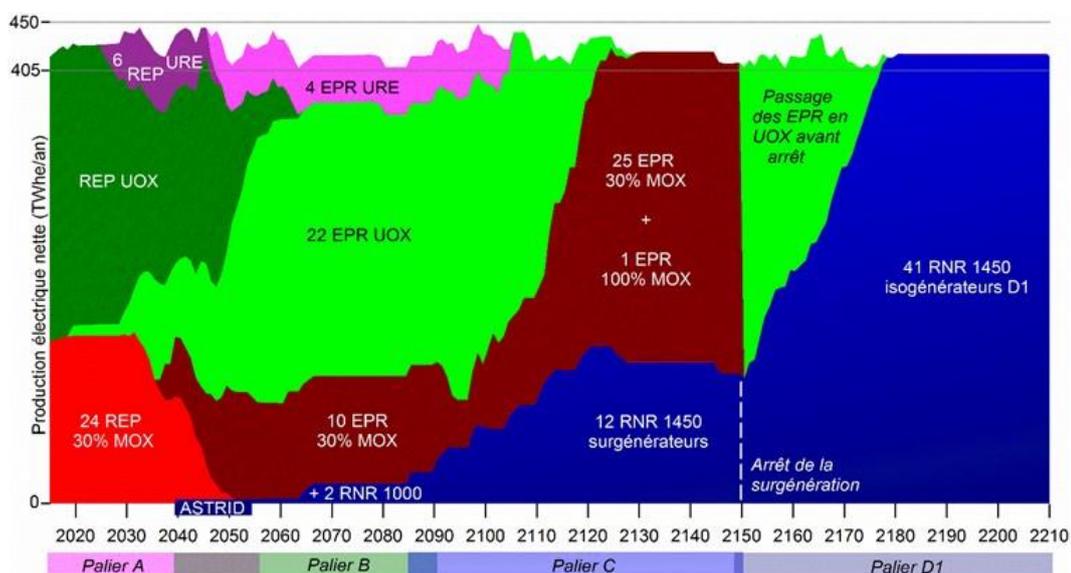


Figure 2: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABCD1

³⁴ On se place davantage dans une hypothèse de hausse du prix de l'uranium que dans celle d'une pénurie brutale.

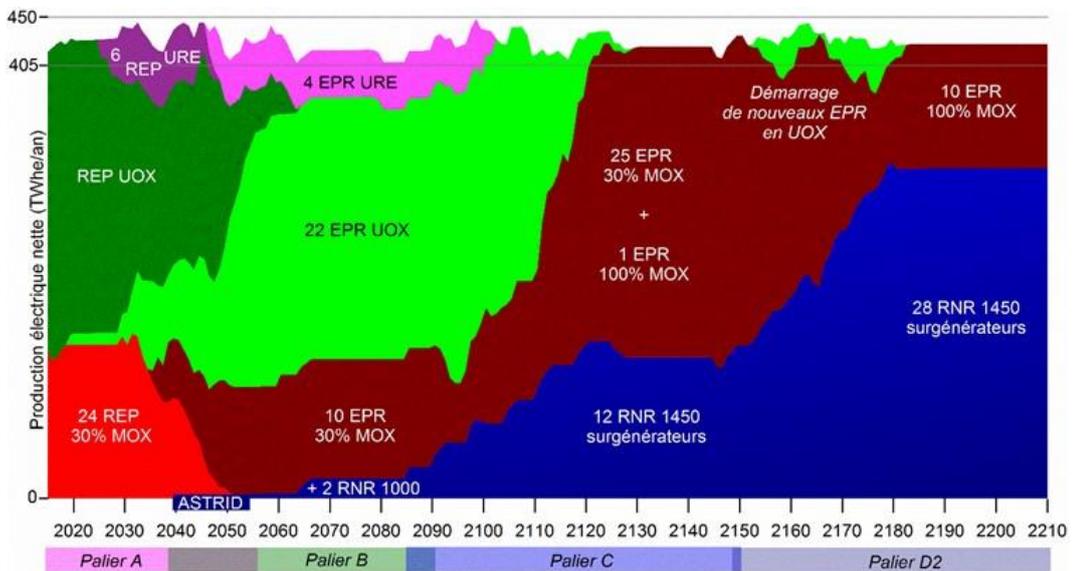


Figure 3: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABCD2

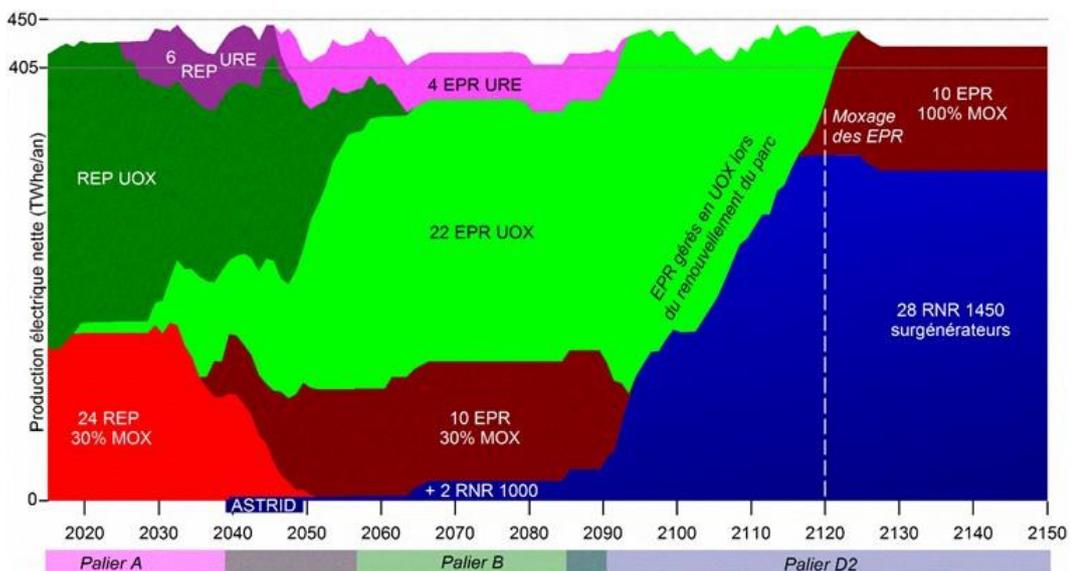


Figure 4: évolution de la composition du parc pour le scénario de transition ABD2

4.2.2 Les matières

La Figure 5 présente la consommation d'uranium naturel cumulée pour les scénarios de transition. Cette consommation se stabilise plus vite pour les scénarios avec transition accélérée vers les RNR : ~1065 kt pour les scénarios ABCD1 et ABCD2 à comparer à ~850 kt pour le scénario ABD2 permettant une économie d'environ 20%. En effet, on s'affranchit du passage par le palier C qui met en œuvre des gestions REP chargées en UOX et partiellement moxées (30%) ; on accélère ainsi l'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	51/90

En revanche, la consommation cumulée en uranium naturel ne cesse de croître pour un parc français continuant à fonctionner en mono-recyclant le Pu sous forme de combustibles REP MOX (scénario A).

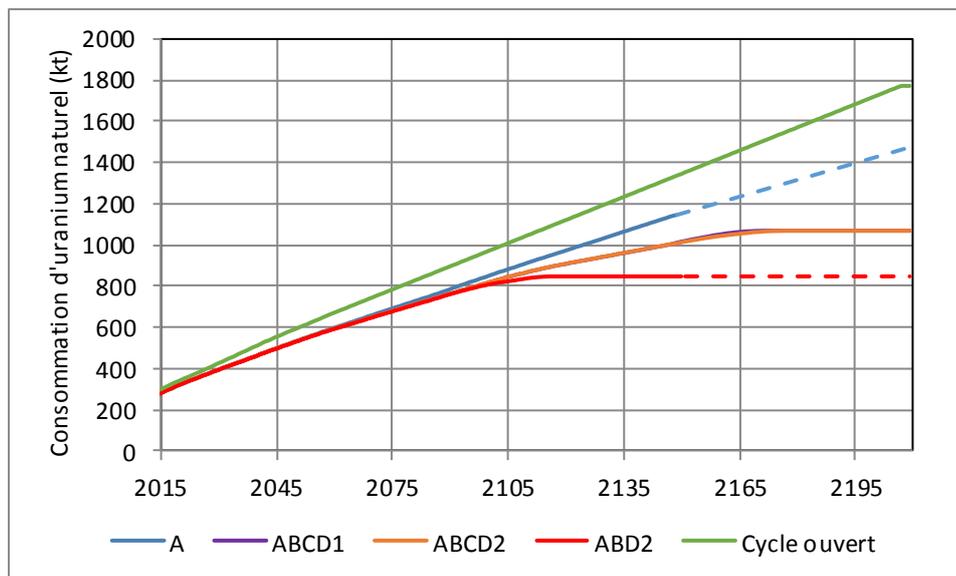


Figure 5 : Consommation d'uranium naturel cumulée pour les scénarios de déploiement des RNR et comparaison avec les scénarios de poursuite du mono-recyclage et du cycle ouvert

La figure 6 présente la production d'uranium appauvri qui résulte de l'enrichissement de l'uranium naturel pour les trois scénarios de transition, pour le scénario A et pour le cycle ouvert (taux de rejet constant pris égal à 0,2%). L'uranium appauvri sert de support aux combustibles MOX REP et compose le combustible fertile des RNR. Toutefois cette utilisation reste marginale au regard des quantités d'uranium appauvri accumulé. Une fois le parc 100% RNR ou mixte REP 100% MOX-RNR installé, le parc ne produit plus d'uranium appauvri.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	52/90

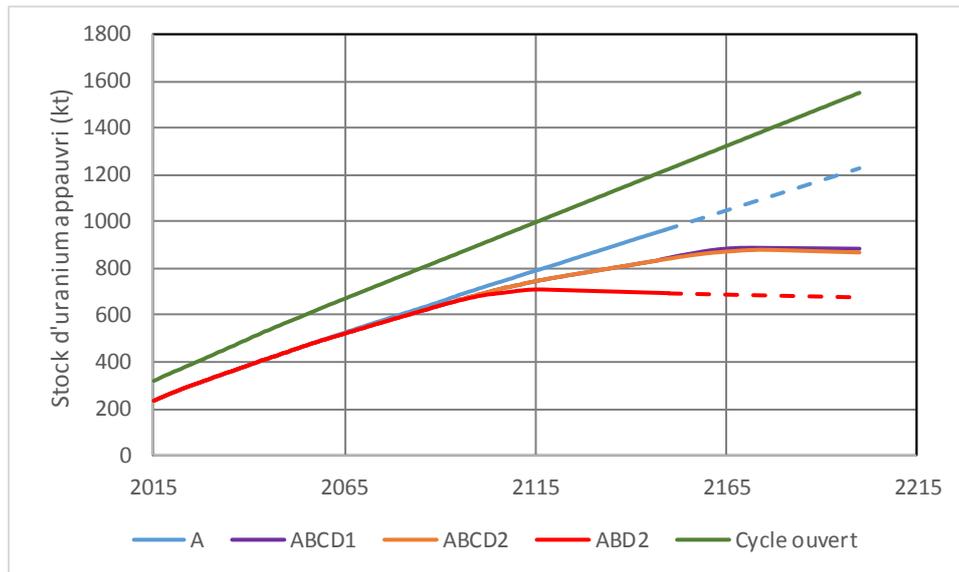


Figure 6 : Comparaison de l'évolution des inventaires d'uranium appauvri pour les scénarios de déploiement des RNR, de mono-recyclage et de cycle ouvert

Les scénarios de transition visant un déploiement progressif des RNR permettent d'atteindre l'objectif de stabilisation de l'inventaire plutonium à une valeur voisine de 1200 tonnes (figure 7). Cette valeur dépend directement du rythme de déploiement des réacteurs RNR, le plutonium étant produit lors des phases précédentes et pendant la transition. A l'inverse, l'inventaire global en plutonium continue à croître linéairement dans le cas du scénario cycle ouvert (scénario 0) ou, à un rythme moindre, lors du mono-recyclage du Pu en REP (scénario A de poursuite de la situation actuelle). Le scénario de transition accélérée ABD2 stabilise l'inventaire Pu dès 2120.

Pour les autres scénarios, cette stabilisation se fait en 2 temps : un premier plateau à l'équilibre du palier C puis un second une fois le parc 100% RNR ou mixte RNR-REP 100% MOX déployé.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	53/90

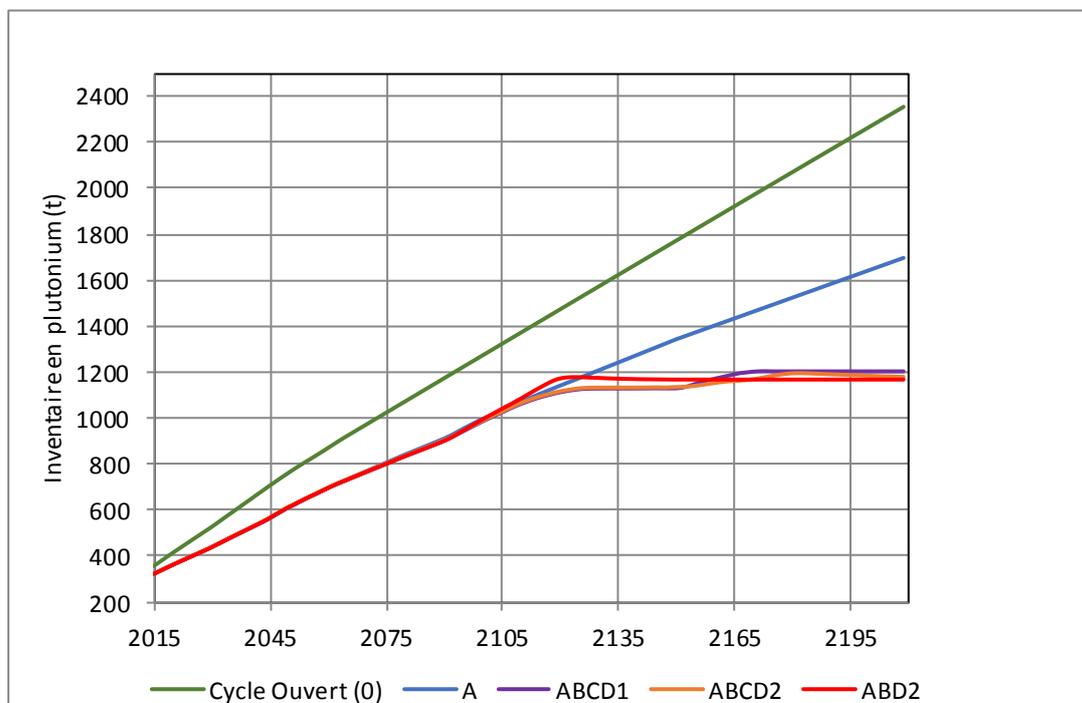


Figure 7 : Evolution de l'inventaire global Pu pour les scénarios de déploiement des RNR

L'évolution dans le temps de la répartition de l'inventaire Pu dans les différentes installations est donnée à titre d'illustration en figure 8 dans le cadre du scénario ABD2. Pendant la première phase du scénario, l'inventaire global en plutonium est principalement constitué du Pu contenu dans les entreposages de combustibles usés en cours de refroidissement. Cet inventaire Pu va alors diminuer au fur et à mesure de la transition vers un parc majoritairement constitué de RNR : en effet, il faut à ce moment-là traiter massivement les combustibles usés pour récupérer le plutonium nécessaire au déploiement soutenu des RNR. Une fois le parc à l'équilibre, la quantité de Pu dans les postes réacteurs et entreposages de combustibles usés est assez voisine. Le plutonium contenu dans les déchets est constitué des pertes au retraitement. Il est à noter que les fonctions de transfert du Pu au traitement retenues dans l'étude sont prises de manière majorante à 0,3% pour les CSD-V et 0,16% pour les CSD-C. Ces valeurs sont enveloppe de la situation actuelle. En fonction des objectifs que l'on se fixera, elles permettent de quantifier les gains attendus. L'inventaire en plutonium séparé reste inférieur à 50 tonnes tout au long du scénario. Il représente de l'ordre de 15 tonnes en fin de scénario.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	54/90

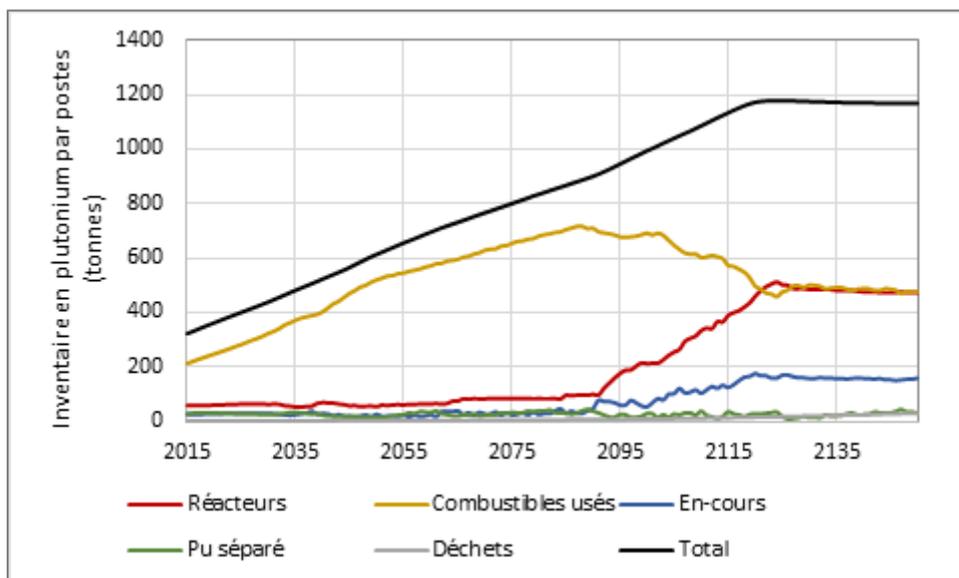


Figure 8 : Scénario ABD2 – répartition par postes de l'inventaire global en plutonium

Il a été privilégié pour ces transitions le recours en priorité au retraitement des combustibles riches en plutonium afin de minimiser les capacités des usines de traitement. En conséquence, il existe en fin de scénario une quantité supplémentaire de combustibles usés UOX ou MOX à entreposer par rapport au strict besoin du parc en plutonium. Cette quantité pourrait être totalement résorbée en optimisant le transitoire et en assouplissant le système de priorisation au traitement, requis dans la présente étude pour les besoins de la modélisation à long terme.

Tous les scénarios de déploiement des RNR permettent de stabiliser les entreposages de combustibles usés contrairement à l'option de poursuite de la situation actuelle (Scénario A) pour laquelle les inventaires de combustibles usés continuent de croître, quoique beaucoup moins rapidement que dans le cadre d'un cycle ouvert (figure 9). Notons ainsi qu'en 2200 par exemple, le prolongement de la situation actuelle conduirait à accumuler environ 57 000 t de combustibles usés répartis de la façon suivante : 45 000 t d'UOX et d'URE auxquelles s'ajoutent 12 000 t de MOX. Quant au cycle ouvert, il conduirait à ce même horizon de temps à accumuler de l'ordre de 220 000 t de combustibles usés UOX. Signalons pour tous les scénarios une augmentation de l'inventaire des combustibles usés entre 2015 et 2080. Jusqu'en 2040 environ, une accumulation respectivement de l'ordre de 110 t/an de combustibles usés MOX et 55 t/an de combustibles usés URE est observée. Entre 2040 et 2060, l'inflexion de pente observée correspond à la quantité de combustibles usés UOX déchargés au moment du renouvellement du parc REP actuel (~240 t/an).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	55/90

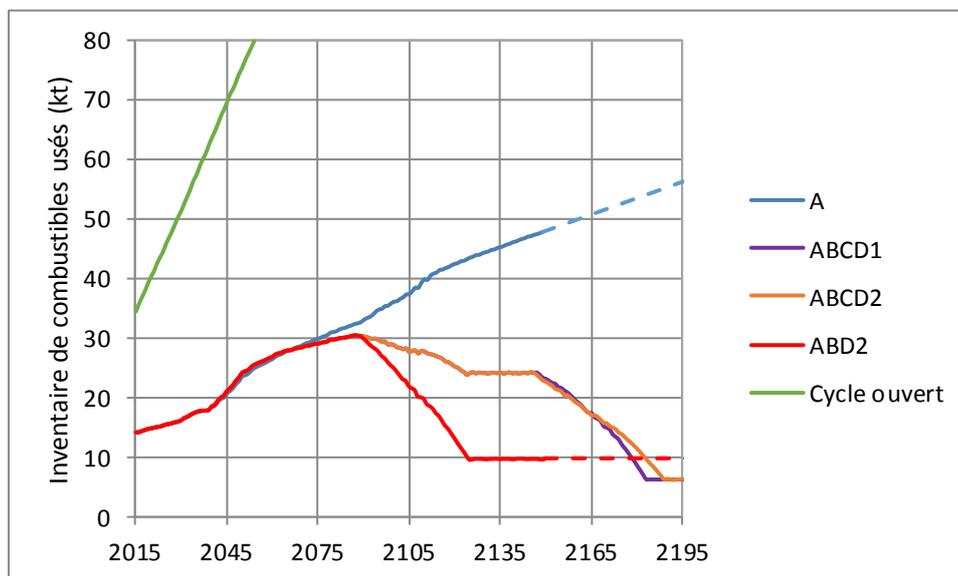


Figure 9 : Evolution des entreposages de combustibles usés pour les scénarios de transition

Pour chacun des scénarios envisagés, l'inventaire en actinides mineurs continue de croître puisqu'aucune stratégie de transmutation n'est mise en œuvre³⁵ (figure 10). Le choix d'une transition de C vers D1 (100% RNR) plutôt qu'un parc mixte D2 conduit à réduire l'accroissement de cet inventaire, les RNR produisant moins d'actinides mineurs que les REP 100% MOX (Après 5 ans de refroidissement et pour des gestions alimentées avec un Pu d'UOX usé, la production d'actinides mineurs dans le combustible MOX RNR est ~4,3 kg/TWh ; celle des actinides mineurs en REP 100% MOX ~13,3 kg/TWh).

La transition accélérée vers les RNR est celle qui favorise le plus cette réduction en s'affranchissant du passage par le palier C fortement producteur d'actinides mineurs (palier C : +4,4 t/an ; palier D1 : +2,3 t/an). En cherchant à réduire le nombre de RNR à déployer au palier C pour maintenir une certaine compétitivité économique par rapport au palier C rapporté dans le Dossier 2015, il en résulte une augmentation du nombre de REP moxés favorisant la production d'actinides mineurs. Ainsi s'il s'avérait nécessaire de maintenir le passage par un palier C en vue d'un déploiement le plus progressif possible de la filière RNR, un compromis sera à rechercher entre le nombre de RNR déployés et la quantité d'actinides mineurs produits.

La répartition de l'inventaire actinides mineurs pour tous les scénarios est proche de Np 27,5% ; Am 70% ; Cm 2,5%. Concernant l'Am, le parc correspondant au scénario A produit de l'ordre de 82% d'²⁴¹Am et 18% d'²⁴³Am. Pour un parc type D2/D1 l'ordre de grandeur est 76% d'²⁴¹Am et 24% d'²⁴³Am (A noter une très faible production d'^{242m}Am volontairement négligé dans les proportions indiquées ici).

³⁵ De nombreux scénarios de transmutation ont été considérés et rapportés dans les Dossiers 2012 et 2015 du CEA.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	56/90

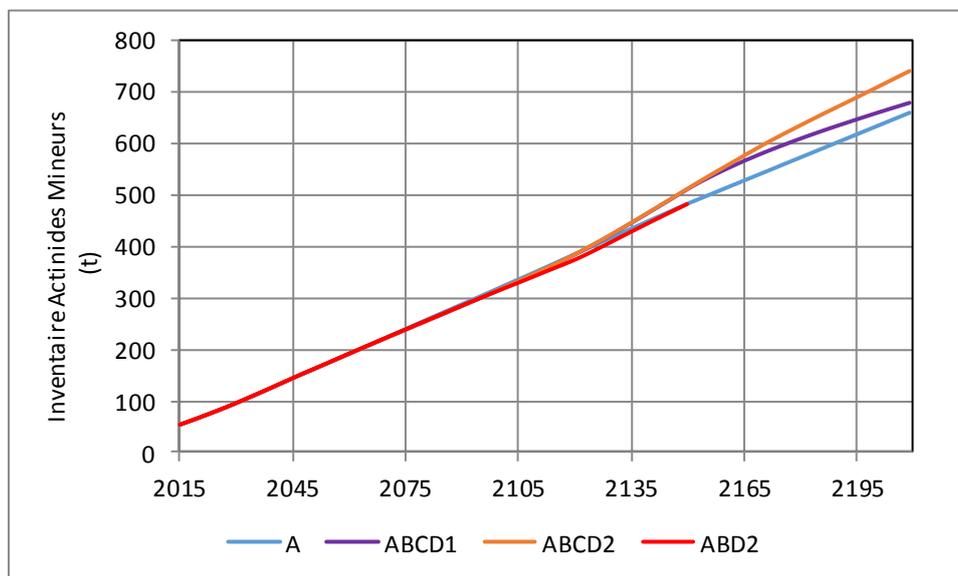


Figure 10 : Evolution de l'inventaire global en actinides mineurs pour les scénarios de déploiement RNR

En termes de répartition, les actinides mineurs produits se retrouvent essentiellement dans les déchets HA comme illustré à titre d'exemple pour le scénario ABD2 en figure 11.

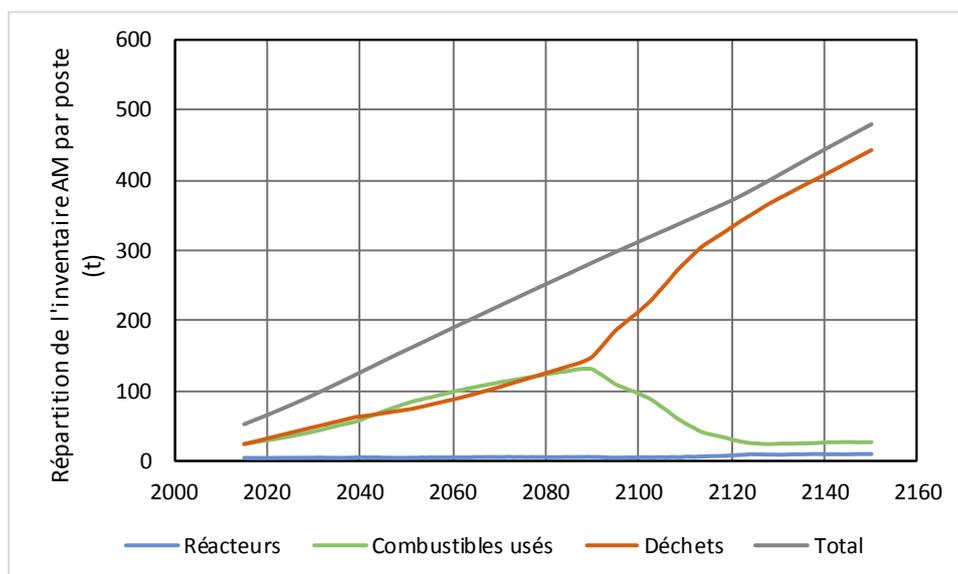


Figure 11 : Scénario ABD2 – répartition de l'inventaire global en actinides mineurs

La figure 12 présente l'évolution du stock d'uranium de retraitement au cours des différents scénarios de transition. Il est fait l'hypothèse que l'URT sert de support au matériau combustible fissile des RNR.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	57/90

Mais sa consommation provient principalement de son recyclage en combustible REP URE, qui requiert son enrichissement préalable. Ainsi pour tous les scénarios, après reprise des gestions URE à l'horizon 2025, le stock d'URT accuse une diminution régulière tant que des gestions URE sont exploitées en REP. Par la suite, il a été fait l'hypothèse d'arrêter ces gestions au moment du déploiement plus massif des RNR et du renouvellement des usines du cycle (#2090). Le retraitement capacitif des combustibles URE démarre également à cette période. Il en résulte alors une augmentation de l'inventaire d'URT (NB : dans le scénario A, les gestions REP URE sont à l'inverse maintenues ce qui explique la poursuite de la diminution des inventaires URT). Une fois les parcs à l'équilibre, l'accroissement de l'inventaire d'URT est ralenti : les gestions REP URE ayant été arrêtées, les combustibles URE ayant tous été retraités, la production nette d'URT est diminuée (il ne provient plus que du traitement des seuls combustibles RNR) et il est utilisé en parallèle comme support des combustibles RNR.

Ces éléments plaident en faveur du maintien des gestions REP URE durant les transitions vers les paliers à forte fraction de RNR (option à examiner lors d'études ultérieures) ou à utiliser l'URT comme support des combustibles REP MOX.

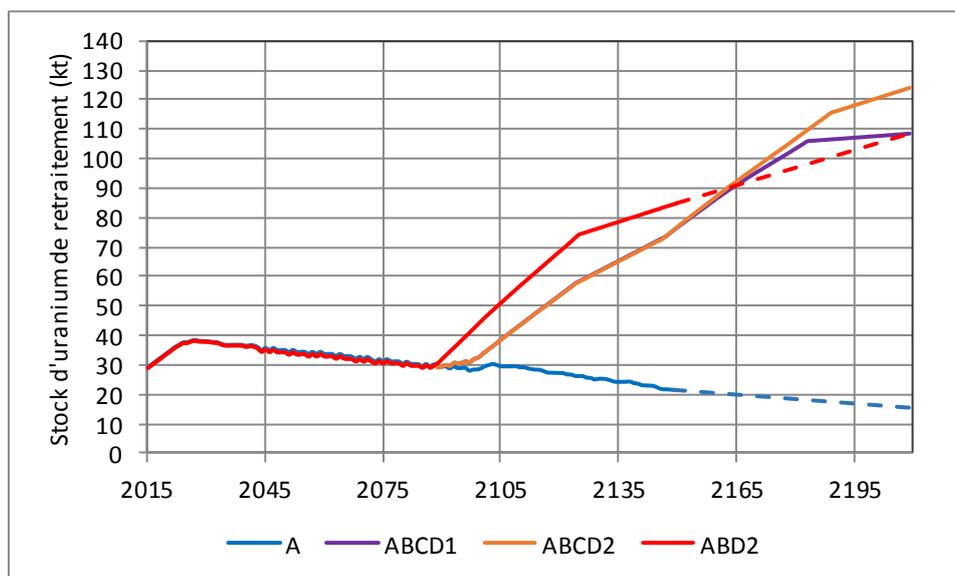


Figure 12 : Evolution des stocks d'uranium de retraitement pour les scénarios de déploiement des RNR

4.3. Les scénarios de multi-recyclage Pu en REP

4.3.1 Description des transitions

Les scénarios de mise en œuvre des concepts MIX et CORAIL ont été réalisés avec des hypothèses identiques aux scénarios de déploiement des RNR en ce qui concerne la description du parc REP actuel et son renouvellement.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	58/90

Par ailleurs, et bien que ce point demande à être consolidé par des études complémentaires, il a été considéré que le déploiement industriel de ces concepts était théoriquement possible en 2045, horizon qui semble à ce stade des études raisonnable pour la mise en service de nouvelles usines du cycle, et la qualification de ces nouveaux produits combustibles.

Enfin, il est rappelé que le concept CORAIL utilisé ici est celui étudié au début des années 2000 et qu'une optimisation du concept par Framatome est en cours, celle-ci n'ayant pu être évaluée pour ce rapport. Ces scénarios de transition ont été définis de façon à mettre en évidence et à tester les capacités de ces concepts à multirecycler et à reprendre les inventaires existants de combustibles usés. Pour ce faire, ils suivent les principes ci-après : le recyclage au plus vite de la totalité des stocks de combustibles usés MOX puis la stabilisation de l'inventaire en plutonium ainsi que de l'ensemble des inventaires de combustibles usés. Une fois que tous les combustibles usés MOX ont été recyclés, les combustibles usés MIX et CORAIL sont retraités.

A titre préliminaire, un scénario de multi-recyclage conjoint du plutonium et de l'uranium de retraitement a été construit afin d'en mesurer la faisabilité (scénario MIX incluant des gestions REP URE).

Les chroniques de déploiement des réacteurs pour les scénarios MIX sont présentées en figure 13. Le nombre de REP MIX déployé pour atteindre la stabilisation de l'inventaire Pu dépend de la teneur en plutonium retenue dans le concept. Ainsi plus cette teneur est élevée, plus la consommation en plutonium dans le réacteur MIX augmente, et moins il faut introduire de réacteurs MIXés dans le parc pour compenser la production de Pu dans les réacteurs chargés en combustibles UOX. Le taux de MIXage du parc varie ainsi entre 29% et 37% en fonction de la teneur Pu considérée (entre 12% et 8%). A noter, qu'il est fait l'hypothèse dans ces études que les réacteurs MIX ou CORAIL sont démarrés avec des cœurs chargés en totalité avec ces combustibles (pas de cœurs de démarrage simulés³⁶). Une large part du Pu est alors mobilisée pour alimenter ces réacteurs, les gestions REP MOX sont dès lors interrompues.

³⁶ Dans une perspective d'études complémentaires, la simulation des cœurs de démarrage CORAIL et MIX permettrait de mieux lisser les besoins en fabrication de ces combustibles. Des études de R&D seraient alors nécessaires sur la gestion des pics de puissance en pile intervenant à l'interface des différents lots de combustibles (UOX/CORAIL ; UOX/MIX)

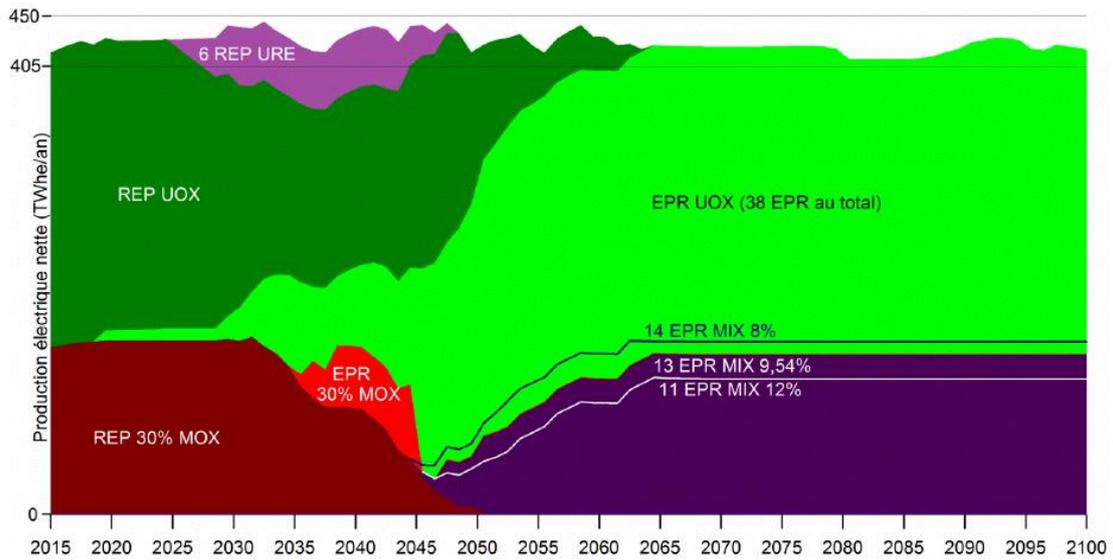


Figure 13 : Evolution de la composition du parc pour les scénarios MIX sans gestion URE

Afin de stabiliser puis réduire l'inventaire en URT, des gestions REP URE ont été introduites pour un cas de scénario MIX comme illustré en figure 14. Ainsi, associé à un parc composé de 13 REP MIX 9,54%, 7 gestions REP URE sont déployées. Ces gestions permettent de recycler non seulement l'uranium des UOX mais aussi l'uranium récupéré du traitement des combustibles utilisés MIX et URE, ce qui permet de valoriser la totalité des combustibles utilisés sortant du parc électronucléaire dès 2065.

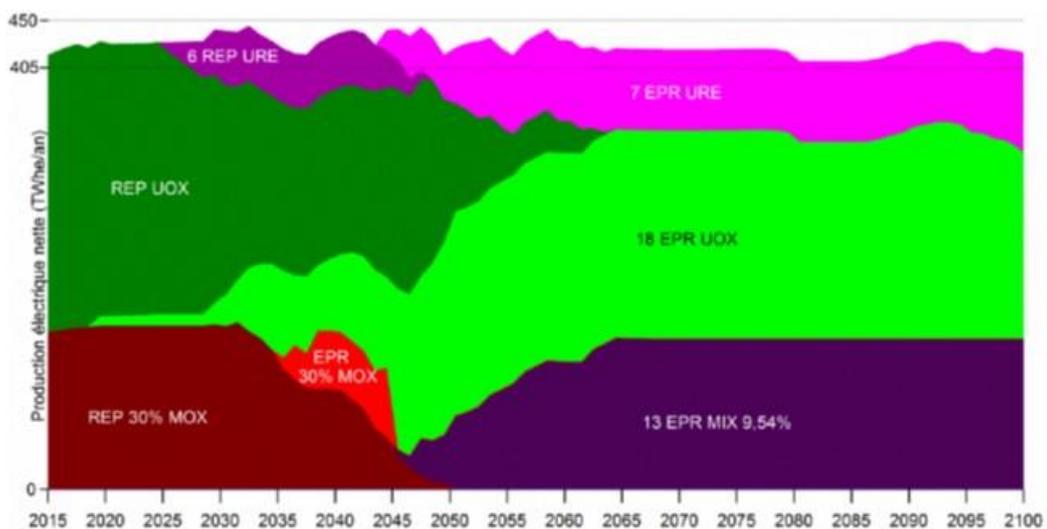


Figure 14 : Evolution de la composition du parc pour le scénario MIX 9,54% avec gestion URE

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	60/90

L'évolution de la composition du parc mettant en œuvre le concept CORAIL est présentée en figure 15. Le concept retenu dans cette étude est très peu consommateur net de Pu. Il s'avère alors nécessaire de déployer une part très importante de réacteurs CORAIL dans le parc afin de stabiliser l'inventaire en plutonium. Ainsi, avec le concept REP CORAIL étudié pour ce tout premier scénario de multi-recyclage en REP, le parc à l'équilibre contient 87% de réacteurs CORAIL ne laissant pas la place au recyclage de l'URT sous forme de gestions REP URE. L'URT est alors entreposé en attente du déploiement des RNR. Des optimisations du concept CORAIL en augmentant le nombre de crayons MOX dans l'assemblage permettront de le rendre davantage consommateur en Pu ; la part à déployer dans le parc sera alors diminuée laissant la place à la mise en œuvre d'une gestion REP URE. Une autre option pourrait consister à considérer des crayons URE dans l'assemblage CORAIL en remplacement des crayons UOX. A ce jour, cette option n'a fait l'objet d'aucune étude.

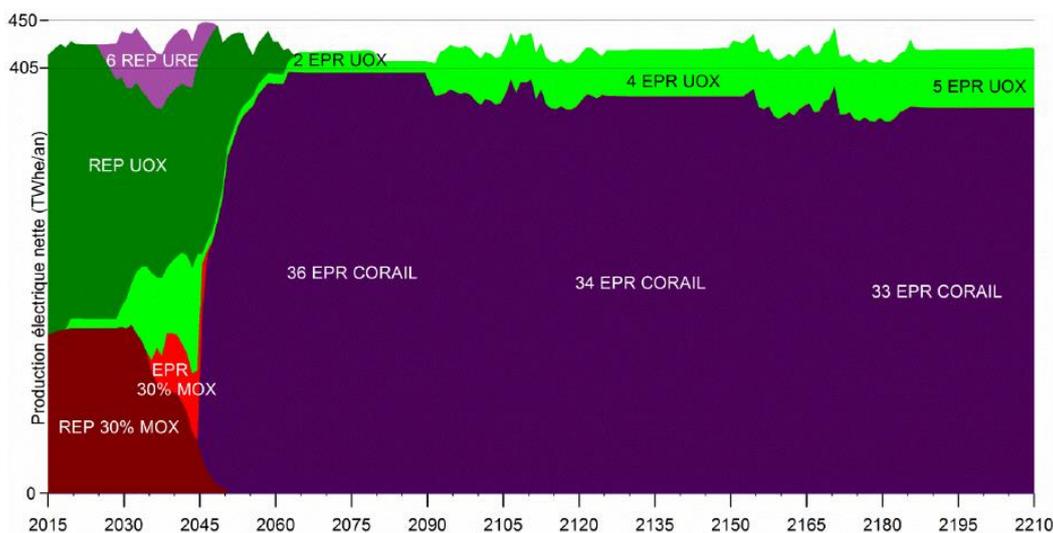


Figure 15 : Evolution de la composition du parc pour le scénario CORAIL

4.3.2 Les matières

La figure 16 présente la consommation d'uranium naturel cumulée pour les scénarios MIX, CORAIL et comparée au scénario A et aux scénarios de déploiement RNR ABD2 et ABCD1.

Ainsi comme illustré sur cette figure, l'indépendance vis-à-vis de l'uranium naturel ne peut être obtenue qu'en s'orientant vers le cycle fermé à savoir le déploiement des RNR.

La consommation en uranium naturel pour le scénario MIX 12% (6700 t/an) se trouve réduite par rapport à celle du scénario MIX 8% (7000 t/an). En effet, la dégradation de l'isotope Pu au cours des recyclages est compensée par l'enrichissement en ^{235}U sur support. Aussi quand la teneur Pu en combustible MIX

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	61/90

augmente, le besoin en enrichissement en ^{235}U pour conserver la longueur de cycle ciblée, diminue (figure 17).

La consommation en uranium naturel au cours des scénarios MIX sans gestions URE est toujours supérieure au scénario A de 10 à 15% selon la teneur Pu considérée. En effet, la forte réduction du flux neutronique dans le domaine thermique du fait de la présence des isotopes du plutonium dans le combustible MIX dégrade l'efficacité de l' ^{235}U qui va alors moins fissionner. L' ^{235}U est alors présent à hauteur de 2% environ au déchargement d'un combustible MIX, à comparer aux 0,8% contenus dans un combustible standard UOX irradié. Le recyclage de cet URT de qualité fissile élevée est donc nécessaire à une bonne économie de la ressource uranium. Pour permettre une économie en uranium naturel par rapport au scénario A de poursuite de la situation actuelle, il est donc nécessaire de recycler l'uranium non consommé dans les combustibles MIX et UOX dans des gestions REP URE. On peut alors réduire la consommation d'uranium naturel d'environ 9% supplémentaire, pour une économie totale, comparé au cycle ouvert, de 25 à 30%.

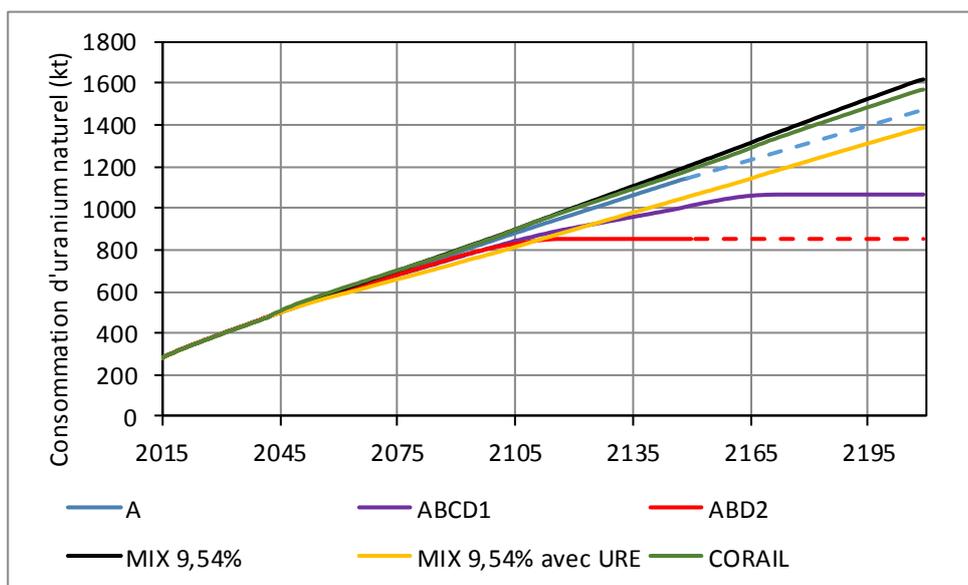


Figure 16 : Consommation d'uranium naturel pour les scénarios MIX et CORAIL comparés aux scénarios A, ABD2 et ABCD1

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	62/90

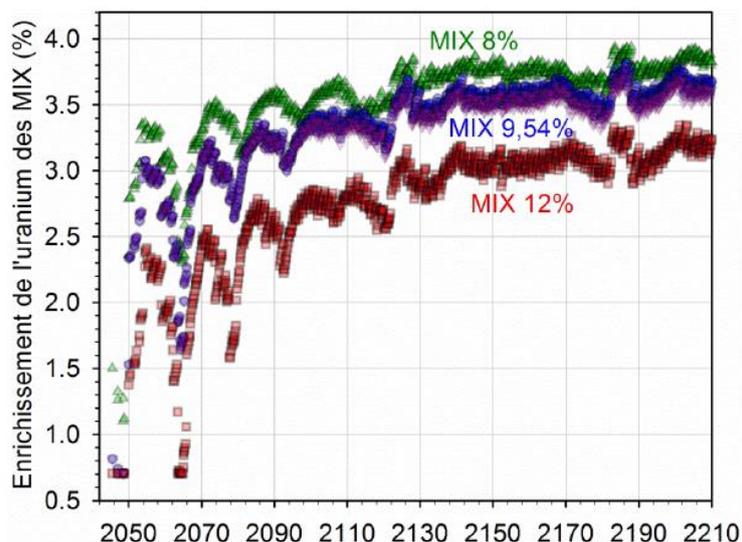


Figure 17 : Enrichissement du support uranium des combustibles MIX au fur et à mesure des recyclages

L'objectif prioritaire retenu pour ces scénarios est de résorber les entreposages de combustibles MOX usés au plus tôt, de façon à mettre en évidence et à tester les capacités de ces concepts CORAIL et MIX à valoriser les combustibles existants. Cette résorption peut être atteinte après 15 ans de mise en œuvre pour les scénarios MIX et 25 ans pour le scénario CORAIL moyennant une cadence de traitement accélérée et ambitieuse des combustibles REP MOX. La faisabilité industrielle de ces cadences à cet horizon de temps reste à démontrer. Les 10 ans de plus pour le concept CORAIL résultent d'un compromis entre le maintien d'un niveau de l'inventaire de Pu séparé raisonnable et le maintien d'une capacité de traitement nominale qui correspond à l'équilibre à venir.

Les inventaires en plutonium total au cours des différents scénarios sont présentés sur la Figure 18 : ils sont relativement stables à partir de 2060 une fois la période d'équilibre du parc atteinte. Cette stabilisation, deuxième objectif important des scénarios de multi-recyclage du Pu en parc thermique après le recyclage de l'ensemble des combustibles usés MOX au plus tôt, intervient une quinzaine d'années après l'introduction en REP des premières gestions MIX ou CORAIL (2045). Avec des inventaires compris entre 640 tonnes et 680 tonnes en 2100 par exemple, la stabilisation recherchée de l'inventaire Pu est bien mise en évidence par comparaison avec la croissance régulière de l'inventaire Pu pour le scénario A (poursuite de la situation actuelle), qui atteint de son côté près de 1000 tonnes à ce même horizon de temps.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	63/90

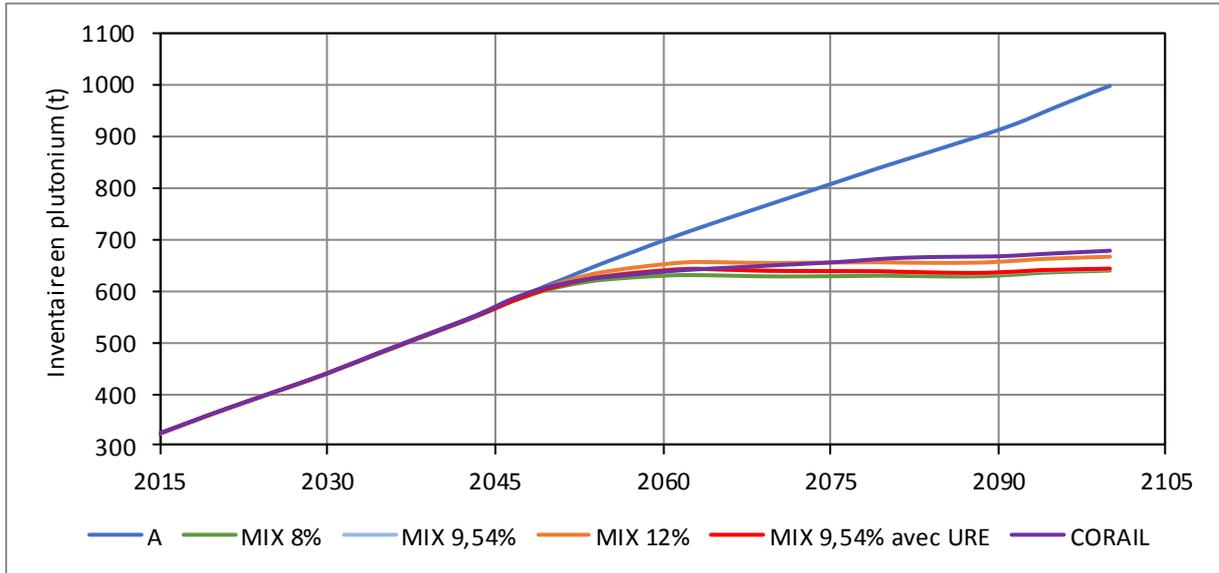


Figure 18 : Evolution de l’inventaire global Pu pour les scénarios de multi-recyclage Pu en REP

Cet inventaire Pu est fortement concentré dans les combustibles usés (de l’ordre de 55%) comme illustré pour les scénarios MIX 9,54% et CORAIL dans les figures 19 et 20.

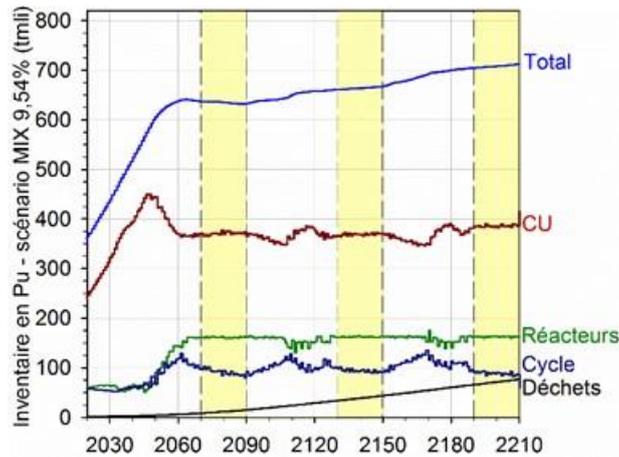


Figure 19 : Répartition de l’inventaire en plutonium pour le scénario MIX 9,54% (sans URE)

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	64/90

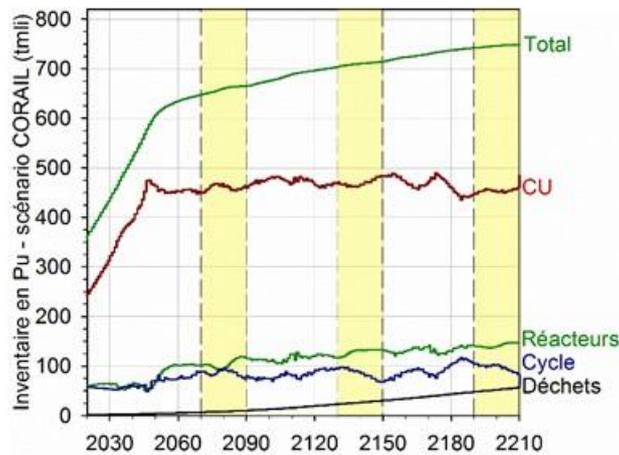


Figure 20 : Répartition de l'inventaire en plutonium pour le scénario CORAIL

Cette répartition différente des scénarios avec déploiement RNR (cf. figure 7) traduit le fait que la quantité de Pu à mobiliser pour faire fonctionner un parc avec multi-recyclage en REP est moindre par rapport aux parcs RNR, entraînant des inventaires de combustibles usés non utilisés qui restent élevés (plus du double par rapport à des parcs RNR). Comme illustré en figure 21, la quantité de combustibles usés se stabilise aux alentours de 21000 t. Sur ces quantités, ~4800 t sont immobilisées aux équilibres des parcs EPR, correspondant aux 5 années de refroidissement qui s'écoulent entre leur déchargement et leur traitement-recyclage. Ainsi près de 15000 t restent sans emploi dans les entreposages. Ces 15000 t de combustibles supplémentaires en entreposage peuvent constituer des réserves de plutonium pour des évolutions de parcs, vers une flotte de RNR par exemple (cf. §4.3.3). Si néanmoins, il fallait procéder à une réduction drastique de ces inventaires de combustibles usés, il faudrait rendre le parc consommateur en plutonium, en MIXant une part plus importante du parc et en recyclant d'avantage d'UOX.

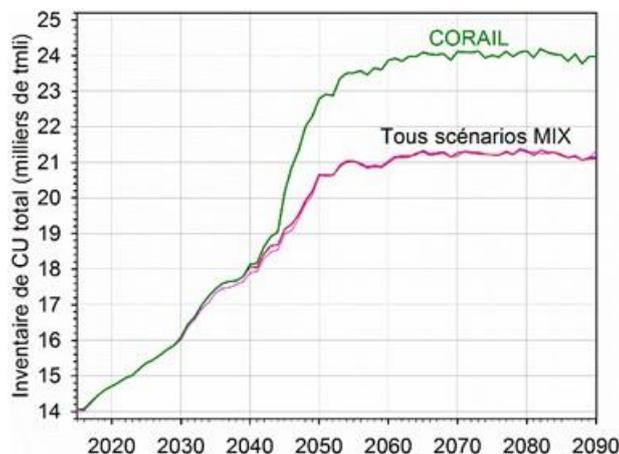


Figure 21 : Evolution des inventaires de combustibles usés totaux pour les scénarios MIX et CORAIL

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	65/90

L'évolution de l'inventaire en actinides mineurs est présentée en figure 22 pour les scénarios MIX et CORAIL et comparée à la production observée pour les scénarios A, ABCD1 et ABD2.

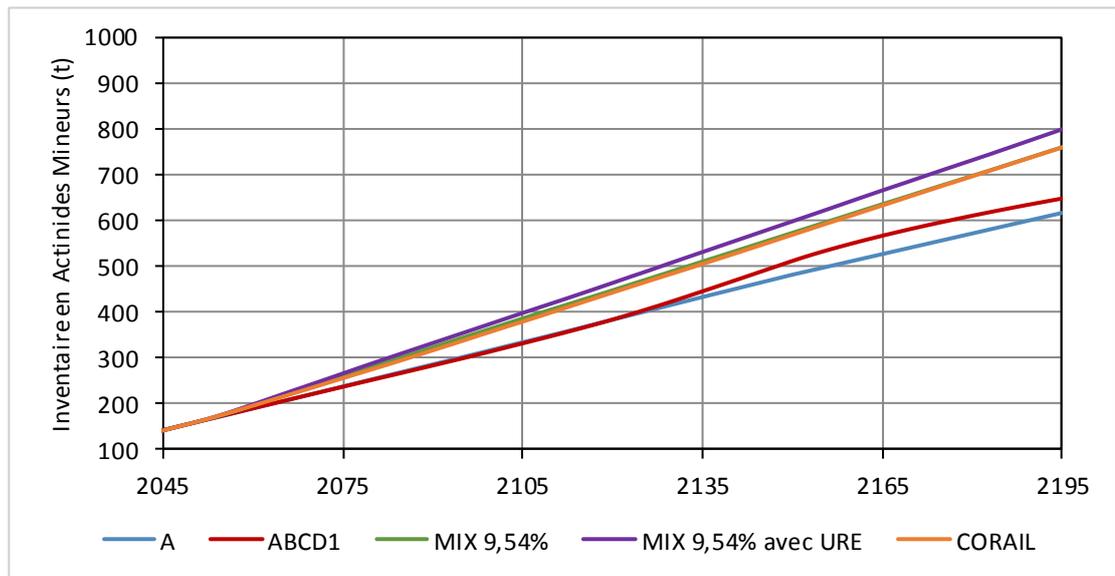


Figure 22 : Inventaire en actinides mineurs pour les scénarios MIX, CORAIL comparés aux scénarios A et ABCD1

Le surcroît de production d'actinides mineurs lorsque des gestions URE sont introduites en parc mixte est essentiellement constitué de neptunium. En effet, la présence de ^{236}U dans le combustible URE conduit à une forte augmentation de la production de ^{237}Np sous irradiation. La répartition de l'inventaire actinides mineurs pour les scénarios de multi-recyclage du Pu en REP est semblable à celle des scénarios de déploiement RNR à savoir : Np 27,5% ; Am 70% ; Cm 2,5%. Néanmoins des parcs MIX ou CORAIL vont produire plus d'actinides mineurs que des parcs RNR comme illustré sur la figure 22. Cette différence s'explique par l'isotopie du plutonium qui se dégrade au fur et à mesure des recyclages pour les concepts MIX et CORAIL étudiés (figure 23), et par le comportement des isotopes pairs du plutonium, absorbant neutronique en spectre thermique. Du point de vue isotopique, une augmentation de la production de ^{243}Am dans ces concepts est observée, en lien avec la forte proportion de ^{242}Pu formé. Par réactions neutroniques à partir de ^{243}Am , du ^{244}Cm est alors produit entraînant une augmentation de la production de curium. Les actinides mineurs se retrouvent essentiellement dans les colis de verres.

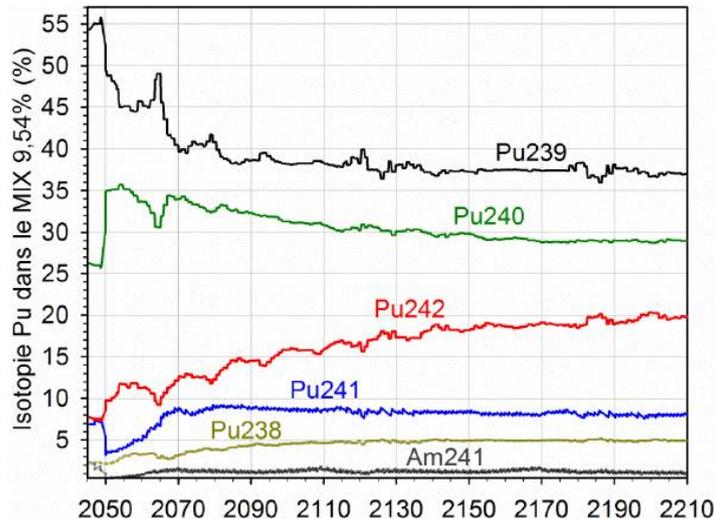


Figure 23 : Scénario MIX 9,54% - évolution de l'isotope Pu au cours des recyclages

Pour ce qui concerne l'évolution de l'inventaire en URT, et sans gestion de l'URT et de l'URE, cet inventaire va s'accumuler à une cadence de l'ordre de 875 t/an à l'équilibre des parcs. Avec recyclage de l'URT voire de l'URE usé, le scénario MIX permet de stabiliser cet inventaire en dessous de 20 000 t. Alors que 4 réacteurs en gestion EPR URE pouvaient être alimentés par le recyclage de l'URT au cours du palier A, 7 réacteurs sont nécessaires pour stabiliser les inventaires dans le cas du scénario MIX 9,54%, ici encore en raison de la meilleure qualité fissile de l'URT.

4.3.3 Impact sur le démarrage des RNR

Dans les scénarios de déploiement progressif de la filière RNR, le déploiement à échelle significative de cette filière débute réellement à l'horizon de cette fin de siècle (considérée à 2090 dans la présente étude, date correspondant à un créneau de renouvellement des réacteurs et des installations du cycle dans les scénarios étudiés). Ces études ont fait apparaître les tensions qu'il pourrait éventuellement y avoir sur le plutonium surtout en cas de nécessité de déployer rapidement la filière. Néanmoins, la faisabilité de déployer des parcs RNR s'est montrée possible vis-à-vis de la disponibilité de la ressource plutonium.

Avec les hypothèses utilisées dans cette étude, notamment concernant le rythme soutenu d'introduction des combustibles MIX et CORAIL dans le parc, les scénarios de multi-recyclage Pu en REP stabilisent l'inventaire plutonium à moins de 700 tonnes en 2090, alors que les scénarios de déploiement progressif de la filière RNR à puissance installée constante approchent un inventaire de 900 tonnes à cette échéance. En outre, le multi-recyclage du Pu en spectre thermique dégrade considérablement la qualité fissile du plutonium. Ainsi, l'inventaire en Pu fissile d'un parc de réacteurs contenant des MIX ou

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	67/90

des CORAIL sera de l'ordre de 300 tonnes. Les études de scénarios de déploiement de la filière RNR montrent par ailleurs que le besoin en plutonium fissile pour déployer un palier C puis un palier D est respectivement de l'ordre de 500 t et 700 t (toujours à puissance installée constante). Ce constat tend à indiquer que la fermeture du cycle à partir d'un parc multi-recyclant le Pu en REP va s'avérer extrêmement difficile dans les conditions et hypothèses retenues pour ce premier scénario d'étude. Cela signifie que l'objectif de stabilisation rapide des inventaires de combustibles usés et de Pu n'est pas compatible avec un objectif de basculement rapide vers une filière RNR de même puissance, à l'horizon de la fin du siècle. La pénurie des ressources en uranium naturel et donc le passage au cycle fermé doit être anticipé de plusieurs décennies afin de récupérer le plutonium nécessaire à ce déploiement. Ce point est donc à considérer avec attention dans les prochains scénarios, qui devront également intégrer une dimension plus industrielle dans l'évolution des besoins de traitement recyclage.

4.4. Le scénario de non renouvellement du parc

4.4.1 Description du scénario

Ce scénario de non renouvellement du parc considère la fermeture de tous les réacteurs REP à la quatrième visite décennale (VD4) et de l'EPR de Flamanville après 60 ans de fonctionnement. Par rapport au scénario A, le recyclage de l'URT en gestion URE n'est pas repris dans les REP 1300 MW à partir de 2025 et les 4 tranches de Cruas ne voient pas de gestion MOX.

La figure 24 présente l'évolution de la production électrique du parc. Une baisse régulière de production est observée entre 2020 et 2035 puis un palier à partir de 2045 pendant quelques années à 50 TWh/an environ correspondant à la fin du palier REP N4. Enfin, l'EPR de Flamanville est le seul réacteur encore en fonctionnement après 2045. Les capacités de traitement sont ajustées au fur et à mesure de l'arrêt des tranches REP 900 MW disposant de gestions MOX. Ainsi, le traitement est fortement diminué à partir de 2020 (100 t/an à comparer à 800 t/an au préalable) et est arrêté vers 2030.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	68/90

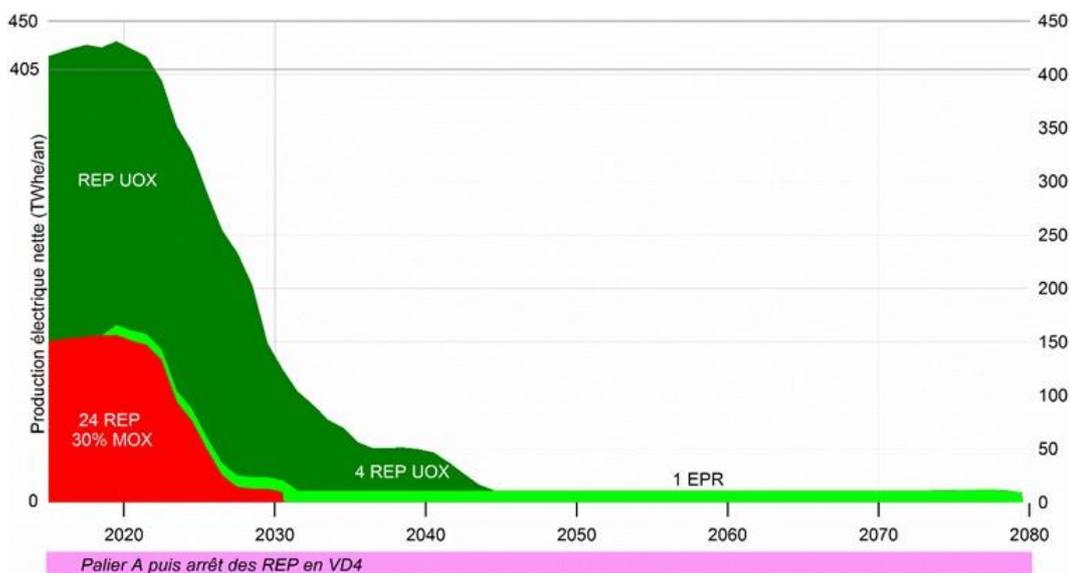


Figure 24 : Evolution de la production électrique pour le scénario d'arrêt du parc

4.4.2 Les matières

Les figures 25 et 26 présentent respectivement l'évolution des inventaires plutonium et actinides mineurs pour le scénario d'arrêt et le scénario A de poursuite de la situation actuelle. Une diminution de l'accroissement de l'inventaire Pu en réacteurs et cycle est observée au fur et à mesure de l'arrêt des réacteurs, en proportion de la diminution de l'électricité produite. A l'arrêt du parc, le plutonium se trouvera essentiellement dans les inventaires de combustibles usés entreposés laissant notamment sans valorisation des combustibles usés MOX (fortement chargés en actinides mineurs) qui seront alors destinés au stockage géologique.

De la même façon, l'accroissement de l'inventaire en actinides mineurs va diminuer au fur et à mesure de l'arrêt des réacteurs. A partir de 2020, du fait de la forte diminution du retraitement engendrée par l'arrêt des tranches moxées des REP 900, les actinides mineurs vont commencer à se répartir essentiellement dans les combustibles usés comme illustré sur la figure 27.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	69/90



Figure 25 : Evolution de l'inventaire plutonium dans les réacteurs et les installations du cycle entre scénario A et arrêt du parc à VD4

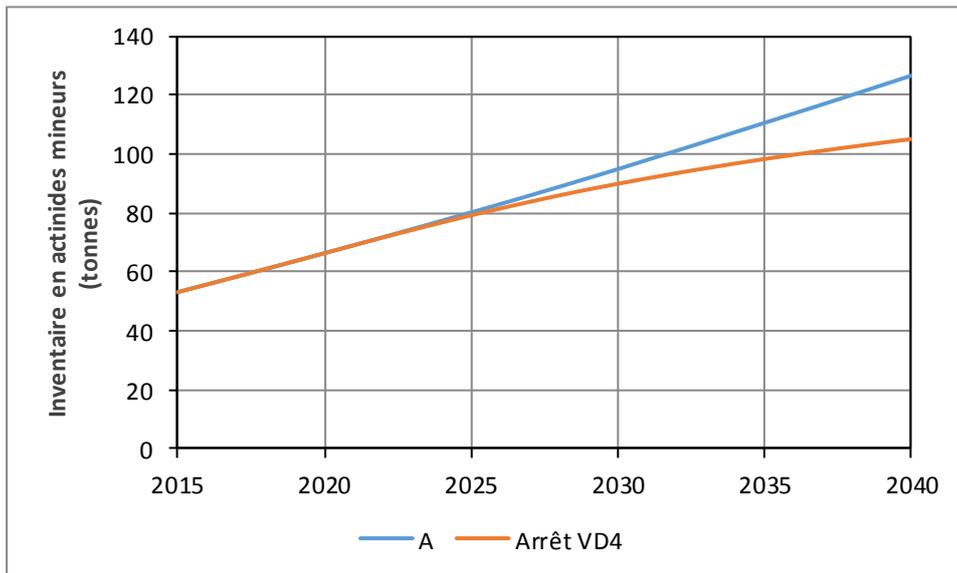


Figure 26 : Evolution de l'inventaire en actinides mineurs entre scénario A et arrêt du parc à VD4

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	70/90

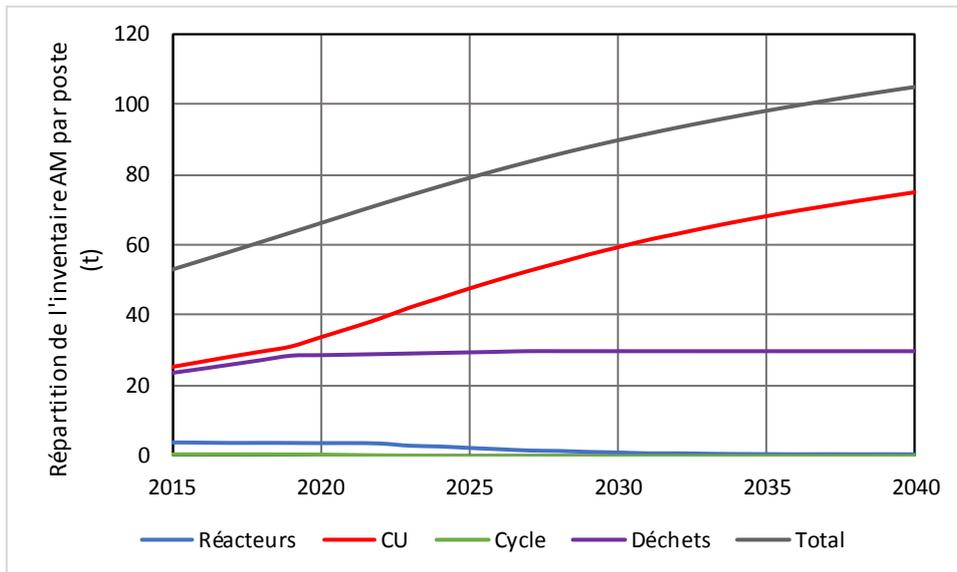


Figure 27 : Scénario d'arrêt du parc à VD4 : répartition des actinides mineurs dans le parc

A l'arrêt du parc, l'essentiel des matières se retrouve dans les combustibles usés. L'inventaire en combustibles usés double entre 2020 et 2030 par rapport à l'inventaire actuel et se stabilise autour de 30 000 t (86% de combustible usé UOX ; 12% de combustible usé MOX et 2% de combustible usé URE). A titre de comparaison, la poursuite de la situation actuelle (scénario A) produirait en 2040 de l'ordre de 16 700 t de combustibles usés (60% de combustible usé UOX ; 28% de combustible usé MOX et 12% de combustible usé URE) (figure 28).

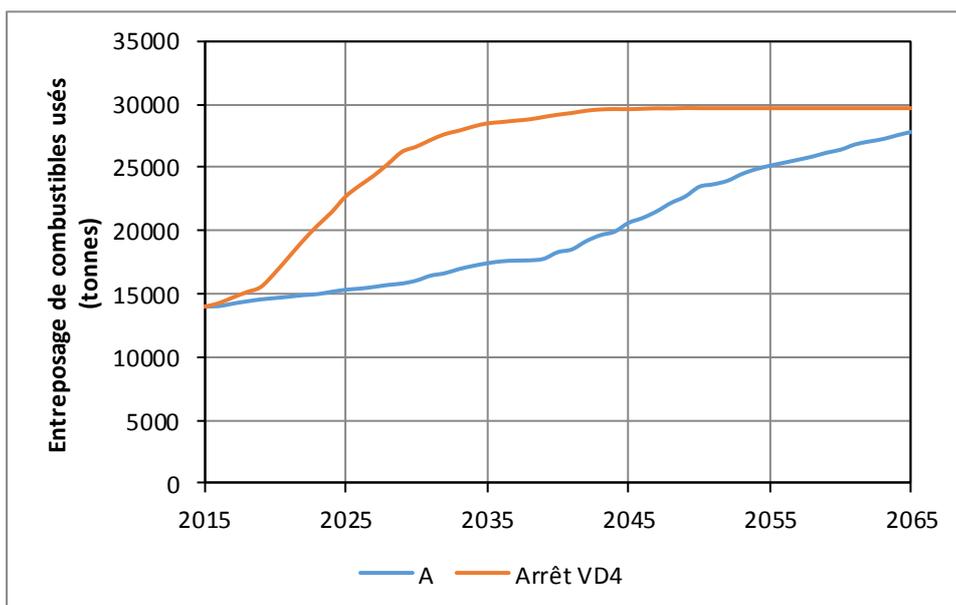


Figure 28 : Evolution des besoins en entreposage de combustibles usés entre scénario A et arrêt du parc à VD4

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	71/90

Ajoutons à ces éléments, le fait que l'inventaire d'uranium de retraitement augmente fortement à l'arrêt de la fabrication de combustibles URE. Il se stabilise à 33 000 t environ une fois que le traitement des combustibles est arrêté.

4.5. Les déchets

Un bilan des déchets CSD-V (conteneur standard de déchets vitrifiés) a été établi, pour chaque scénario étudié, sur deux périodes distinctes : de 2016 à 2100 et de 2050 à 2210.

Ces deux inventaires cumulés tiennent compte de l'évolution dynamique du parc électronucléaire français supposée dans nos études.

Dans le cas du multi-recyclage du plutonium en RNR, le nombre de RNR déployés évolue significativement à partir de 2090 (date de déploiement du palier C, visant 30 % de RNR, ou date de déploiement plus ambitieux du palier D2, visant 75 % de RNR). L'impact des évolutions du parc sur la production de déchets ne pourra être appréhendé complètement que sur la seconde période d'étude 2050-2210. Celle-ci peut être considérée comme représentative des nouvelles stratégies (la production électrique du parc actuel, intégrant le réacteur EPR Flamanville, ne représente plus que 1,5 % de la production totale cumulée sur cette période).

Le déploiement du multi-recyclage du plutonium en REP est, quant à lui, plus rapide dans nos études (dès 2045). Sur la période 2016-2100, les critères étudiés, comme la production de déchets radioactifs, sont plus rapidement impactés par les différentes stratégies.

Au cours de la première période (2016 – 2100, tableau 8), le déroulement des scénarios ABCD1 et ABCD2 est identique avec un traitement de combustibles MOX progressif et de moindre ampleur que pour les scénarios de multi-recyclage du plutonium en REP (pour ces derniers, le traitement des combustibles MOX riches en actinides mineurs débute dès 2045 à une capacité très élevée, ~400 t/an avec les hypothèses du scénario considéré). Cette différence entre les types et les quantités de combustibles traités se retrouve dans la production cumulée des déchets HA de type CSD-V : les scénarios de multi-recyclage en RNR conduisent sur cette période à une plus faible quantité de déchets vitrifiés que dans le cas des options de multi-recyclage en REL avec des combustibles MIX et, dans une moindre mesure, avec des combustibles CORAIL.

L'écart de production de déchets HA entre les scénarios MIX et CORAIL, de l'ordre de 2000 m³, provient du traitement d'une plus grande quantité de combustibles MOX (deux fois plus) sur la période 2050-2060 pour les options MIX. En effet, pendant cette phase, les besoins en plutonium destinés aux combustibles MIX ayant une teneur de 9,5 ou 12 % sont plus importants que pour les combustibles CORAIL avec une teneur plus faible en début de scénario (de l'ordre de 6 % dans les crayons MOX).

Globalement, la comparaison des cumuls pour l'ensemble des scénarios met en évidence l'influence du traitement de combustibles MOX riches en actinides mineurs : les scénarios de multi-recyclage

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	72/90

conduisent quant à eux à un surplus de colis de déchets vitrifiés par rapport au palier A, pouvant aller de +30% dans les scénarios de déploiement des RNR jusqu'à +100 % dans le cas du multi-recyclage en REP.

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
9930 (*)	12280	12280	12580	15870	15740	13920

Tableau 8 : cumul des déchets HA de type CSD-V sur la période 2016 – 2100 (m³)

(*) : ≈12000 t de MOX usés sont entreposés ou stockés dans ce scénario en 2210

Au cours de la période 2050-2210 (tableau 9), l'écart entre les scénarios de multi-recyclage en REP/RNR et le palier A se creuse et tend vers un facteur 2 imputable à la gestion des combustibles riches en plutonium. Il est à noter que le palier A conduit en revanche à entreposer, puis vraisemblablement à stocker, la totalité des combustibles MOX et URE usés.

Entre scénarios de multi-recyclage en REP ou RNR, les écarts se resserrent avec deux valeurs extrêmes relatives aux scénarios ABCD2 et ABD2 au cours desquels sont traités des combustibles MOX à des cadences similaires (70 t/an entre 2050-2089, 180 t/an entre 2090-2150 et 245 t/an entre 2151-2210, le cumul traité étant du même ordre de grandeur). Ces deux scénarios se différencient des autres par un flux total de combustibles à traiter différent sur la période 2151-2210, avec une valeur minimale pour ABD2 (730 t/an) ou maximale pour ABCD2 (1190 t/an) comparativement aux cadences comprises entre 900 et 1010 t/an pour les 4 autres scénarios de multi-recyclage du plutonium.

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
17510 (*)	32150	36160	30970	33960	33990	32360

Tableau 9: cumul des déchets HA de type CSD-V sur la période 2050 – 2210 (m³)

(*) : ≈12000 t de MOX usés sont entreposés ou stockés dans ce scénario en 2210

La production cumulée des déchets MA-VL a également été évaluée sur les mêmes périodes. Elle intègre les déchets produits lors de l'exploitation des installations (réacteurs, usines de recyclage) ainsi que les déchets de structure des assemblages usés supposés compactés.

Sur la période 2016-2100 (tableau 10), les volumes cumulés de déchets MA-VL des scénarios de multi-recyclage en REP/RNR sont relativement similaires (à 10 % près), l'écart entre eux s'expliquant, avec nos hypothèses, par une part plus importante des déchets contaminés en émetteurs alpha provenant de la fabrication des combustibles MIX/CORAIL à une capacité supérieure à celles des combustibles RNR. Les usines de fabrication des combustibles MOX et de traitement du palier A fonctionnant à de plus faibles cadences génèrent proportionnellement moins de déchets. Par ailleurs, en 2100 l'influence des RNR

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	73/90

n'est pas visible en raison de leur démarrage progressif (5 réacteurs RNR 1450 MW sont mis en service après 2185 auxquels s'ajoutent le démonstrateur ASTRID et les 2 RNR 1000 MW ayant respectivement divergé en 2039, 2064 et 2065).

Sur la période 2050-2210 (tableau 11), la quantité de déchets MAVL produits par les scénarios de multi-recyclage en RNR est plus importante en raison d'une production plus marquée des déchets de structure et, dans une moindre mesure des déchets générés par l'exploitation des réacteurs. Sur cette longue période, la production des déchets MA-VL issus des options de recyclage en REP est plus faible que dans le cas avec RNR. Toutefois, la production de déchets MA-VL reste nettement supérieure à celle du palier A ; l'écart s'explique par des capacités de traitement plus importantes induisant plus de déchets de structure et de déchets d'exploitation et, dans une moindre mesure par des capacités de fabrication de combustibles riches en plutonium plus élevées.

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
35100	38750	38750	40590	42120	41880	41480

Tableau 10 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2016 – 2100 (m³)

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
60040	94520	97950	99660	79520	78850	79100

Tableau 11 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2050 - 2210 (m³)

4.6. Les transports

Les configurations de transport d'assemblages combustibles ayant permis d'établir les bilans des transports de combustibles par palier énoncés au paragraphe 3.1.3, ont été également appliquées aux flux d'objets à transporter au cours des trois scénarios de transition ABCD1, ABCD2 et ABD1. Les résultats sont exprimés en relatif par rapport au flux annuel de transports nécessaires au scénario A sur la même période de temps.

Scénarios	ABCD1	ABCD2	ABD2
Part de RNR dans le parc	100% à partir de 2180	72% à partir de 2180	72% à partir de 2130
Assemblages neufs	2,5	2,5	2,8
Assemblages usés	3,6	3,3	4

Tableau 12 : ratio du nombre de transports sur la période 2050-2210 par rapport au scénario A

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DIS/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	74/90

La comparaison entre les scénarios ABCD1 et ABCD2 confirme que le nombre total de transports tend à augmenter avec la proportion de combustibles MOX dans le parc. Notons toutefois des résultats comparables pour le transport des assemblages neufs du fait d'une compensation des flux de transport entre les scénarios ABCD1 et ABCD2 : si le nombre de transport de combustibles neufs RNR est effectivement plus important pour ABCD1, le parc final étant composé uniquement de RNR iso-générateurs, le nombre de transport de combustibles MOX sera plus faible pour ABCD1 que pour ABCD2, qui avec un parc final D2 mixte fait appel à des REP 100% MOX ainsi qu'à des RNR surgénérateurs (avec des couvertures radiales à transporter).

Le scénario ABD2 est celui qui conduit à augmenter sensiblement le nombre de transports, conséquence du déploiement plus rapide des RNR.

4.7. Synthèse de l'inventaire prospectif sur les matières et déchets en 2016 et 2100

Le tableau 13 présente les estimations des quantités de matières et de déchets radioactifs à différentes échéances de temps que sont 2016 et 2100 et répond aux prescriptions de l'article 51 du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs selon plusieurs scénarios prospectifs.

Les inventaires prospectifs sont présentés pour les scénarios de transition suivants :

- Le scénario de cycle ouvert correspondant à un parc hypothétique français pour lequel aucune stratégie de traitement-recyclage n'aurait été mise en place,
- Le scénario de renouvellement du parc français actuel avec poursuite de la stratégie de mono-recyclage (scénario A),
- Des scénarios de renouvellement du parc français actuel selon différentes options du cycle : déploiement progressif des RNR (scénarios ABCD) ou déploiement du multi-recyclage en REP (scénarios CORAIL et MIX),
- Le scénario de non-renouvellement du parc (scénario d'arrêt à la VD4).

La production cible annuelle retenue est de l'ordre de 420 TWh/an.

Pour tous ces scénarios excepté pour le scénario cycle ouvert, la situation de départ est identique. De ce fait, aucun écart n'est observé entre les scénarios en 2016.

Si aucune stratégie de traitement-recyclage du plutonium et de l'uranium sous forme de MOX et URE n'avait été mise en place en France, l'inventaire en combustibles usés UOX serait augmenté d'un facteur 3 environ par rapport à la situation actuelle du parc et l'inventaire en uranium appauvri serait plus important d'environ 34%. L'inventaire en plutonium dans le cycle serait plus élevé d'environ 12% (soit +40 tonnes). L'inventaire en actinides mineurs serait en revanche plus faible de l'ordre de 7% (soit -4 tonnes), les gestions REP UOX produisant moins d'actinides mineurs que des gestions REP MOX (mais plus de combustibles usés et de plutonium).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	75/90

En 2100 des différences sensibles apparaissent entre les scénarios prospectifs. Toutefois il faut souligner que le bénéfice du déploiement progressif des RNR n'apparaît pas encore à cet horizon de temps pour les scénarios ABD et ABCD (le déploiement à des degrés significatifs de la filière RNR ne démarrant qu'à la fin du siècle actuel). Il faut se référer aux résultats de l'approche dynamique rapportés dans les paragraphes précédents pour apprécier pleinement le bénéfice de cette option.

L'analyse des inventaires en 2100 nous indique les éléments suivants :

- Dans le cas des scénarios MIX/CORAIL considérés avec une hypothèse d'arrêt des gestions REP URE dans le parc, il est constaté une augmentation de l'inventaire en uranium de retraitement d'un facteur 3 par rapport au scénario A avec recyclage URT. A contrario, avec la mise en place de gestions URE quand cela est faisable, l'inventaire en uranium de traitement est divisé par plus d'un facteur 2 par rapport au monorecyclage. Pour les scénarios de déploiement des RNR, les gestions REP URE ont été maintenues par hypothèse jusqu'en 2100. Signalons également que l'URT est également utilisé en support du combustible fissile des RNR.
- Ce constat plaide en faveur du maintien des gestions REP URE comme étudié pour le scénario MIX 9,54% y compris pour les scénarios de déploiement des RNR.
- Les scénarios de multi-recyclage du plutonium en REP ou RNR permettent de diminuer les inventaires de combustibles usés MOX par rapport au scénario de poursuite de la situation actuelle (scénario A).
- Les scénarios MIX/CORAIL ont été élaborés avec pour objectif de résorber au plus tôt les combustibles usés MOX REP contrairement aux scénarios de déploiement progressif des RNR pour lesquels seule leur stabilisation a été recherchée à cet horizon de temps. L'impact de cette différence d'hypothèse s'observe dans le tableau 8. L'inventaire en combustibles usés MOX pour les scénarios ABD/ABCD est ainsi stabilisé à de l'ordre de 4000-5000 tonnes. Ce même inventaire est résorbé pour les scénarios MIX/CORAIL, mais remplacé par un inventaire de combustibles usés MIX/CORAIL stabilisé à hauteur de 2000 à 3000 tonnes. L'inventaire en combustibles usés CORAIL est en revanche très important (18 000 tonnes) du fait d'un parc contenant autour de 90% de gestions CORAIL en 2100.
- La maîtrise de l'inventaire en plutonium dès 2100 (et avant) pour les scénarios de recyclage du plutonium en REP MIX/CORAIL est mise en évidence. Cet inventaire est de l'ordre de 650 tonnes selon la teneur Pu considérée dans ces combustibles.



DIFFUSION ORDINAIRE

Indice 0

Document Technique DEN

76/90

2016	Cycle ouvert	Scénario A	Scénarios ABD2	Scénarios ABCD	Scénario MIX 8%-9,54%-12%	Scénario MIX 9,54% avec gestions URE	Scénario CORAIL	Arrêt du parc
Uranium de retraitement (URT)		30 300	30 300	30 300	30 300	30 300	30 300	30 300
Uranium appauvri (sans URT app.)	328 200	243 800	243 800	243 800	243 800	243 800	243 800	243 800
Combustible irradié UOX	35 700	11 420	11 420	11 420	11 420	11 420	11 420	11 420
Combustible irradié MOX	s.o.	1 960	1 960	1 960	1 960	1 960	1 960	1 960
Combustible irradié URE	s.o.	690	690	690	690	690	690	690
Inventaire Pu	370	330	330	330	330	330	330	330
Inventaire AM	52	56	56	56	56	56	56	56
2100	Cycle ouvert	Scénario A	Scénarios ABD2	Scénarios ABCD	Scénario MIX 8%-9,54%-12%	Scénario MIX 9,54% avec gestions URE	Scénario CORAIL	Arrêt du parc
Uranium de retraitement (URT)	0	28 800	33 700	45 000	89 600	12 700	89 000	33 200
Uranium appauvri (sans URT app.)	900 200	716 200	683 300	689 000	737 500-730 000-718 600	662 700	726 600	305 100
Combustible irradié UOX	124 500	18 160	19 100	18 230	14 630-15 400-15 800	8 900	2 200	25 700
Combustible irradié MOX	s.o.	9 500	4 200	5 000	0	0	0	3 300
Combustible irradié URE	s.o.	8 300	0	4 100	3250	9 800	3 260	700
Combustible irradié MIX/CORAIL	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.	3 000-2 200-1 800	2 200	18 000	s.o.
Combustible irradié RNR	s.o.	s.o.	1 280	1 090	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Combustible irradié FCR	s.o.	s.o.	170	255	s.o.	s.o.	s.o.	s.o.
Inventaire Pu	1275	995	995	985	640-640-665	645	675	430
Inventaire AM	280	320	315	315	365	380	360	105

Tableau 13 : Inventaires prospectifs des matières en 2016 et 2100 (exprimés en tonnes)

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MIMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	77/90

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
9930	12280	12280	12580	15870	15740	13920

Tableau 14 : cumul des déchets HA sur la période 2016 – 2100 (m³)

A	ABCD1	ABCD2	ABD2	MIX 9,54% URE	MIX 12%	CORAIL
35100	38750	38750	40590	42120	41880	41480

Tableau 15 : cumul des déchets MA-VL sur la période 2016 – 2100 (m³)

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	78/90

5. Emprise au stockage pour les scénarios de déploiement progressif des RNR

5.1 Objectifs de l'étude

Sont rapportés ci-dessous les résultats de l'étude menée par l'Andra en collaboration avec le CEA dans la période 2017-2018, sur le stockage de déchets produits selon différentes configurations de déploiement de futurs parcs électronucléaires et telles que décrites dans les chapitre 3 (approche statique ou par palier) et 4 (approche dynamique).

Cette étude ne peut préjuger de la localisation du stockage des déchets considérés ici. Pour le stockage géologique, on retient par hypothèse une roche argileuse similaire à la couche d'argilites étudiée en Meuse/Haute-Marne pour le projet Cigéo. Cette hypothèse permet de se fonder sur les concepts et connaissances développés pour le projet.

Contrairement aux études précédemment réalisées par l'Andra et le CEA dans la perspective de futurs parcs, la présente évaluation introduit des cas de stockage direct de combustibles usés. Cette étude pour le stockage éventuel de combustibles usés non retraités n'est toutefois pas assez avancée pour la présente évaluation, particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer des emprises souterraines de stockage pour des quantités importantes de combustibles usés présentant des dégagements thermiques élevés. Cela limite la portée de la présente étude pour les situations faisant appel au stockage direct de combustibles usés.

Les emprises souterraines (et volumes excavés) pour le stockage géologique de déchets thermogènes sont très sensibles à la conductivité thermique et aux paramètres conditionnant le comportement thermo-hydro-mécanique de la roche d'accueil. L'étude de la zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie « ZIRA », zone dans laquelle l'Andra prévoit d'implanter l'installation souterraine de Cigéo, montre des variations significatives de ces paramètres à l'échelle de cette zone. Ces variations peuvent néanmoins être considérées faibles au regard des différences à attendre entre sites argileux distincts.

Pour la présente étude, l'Andra a retenu initialement de mener des calculs de dimensionnement thermique et thermo-hydro-mécanique (THM) sur la base des caractéristiques de la zone pressentie pour implanter les alvéoles de stockage de déchets « HA0 » de la phase industrielle pilote de Cigéo. Cette zone se situe au barycentre géométrique de la ZIRA. Ses caractéristiques apparaissent moins favorables au plan THM que les caractéristiques moyennes de l'ensemble de la zone. Cela confère aux calculs initialement réalisés un caractère fortement conservatif. Toutefois, l'étude comporte également une analyse de la sensibilité aux variations des caractéristiques thermiques et THM sur la zone de Cigéo occupée par les déchets HA vitrifiés, ainsi que des projections de ce que seraient des

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	79/90

emprises de stockage de déchets HA vitrifiés futurs dans une zone de mêmes caractéristiques que la zone HA de Cigéo.

Dans ce contexte, et sans préjudice d'évolutions scientifiques et technologiques des modalités de production des déchets HA et des combustibles et/ou des méthodes de stockage aux échelles de temps concernées, les éléments quantitatifs donnés ci-après ne peuvent être raisonnablement utilisés que pour comparer, qualitativement, les différentes configurations étudiées. Ils ne prétendent pas préfigurer de futurs sites et installations de stockage.

5.2 Evolution des critères par rapport au « dossier Argile 2005 »

Pour le dimensionnement du projet Cigéo, l'Andra retient d'une part des critères purement thermiques et d'autre part des critères THM.

Les critères de dimensionnement thermique consistent à maintenir la température du stockage en dessous de 100 °C. En pratique, l'Andra a retenu jusqu'ici une limite de 90 °C au point le plus chaud des argilites, au contact du chemisage. En complément, la pertinence d'un critère limite de 90 °C est également à l'étude cette fois-ci à l'extrados du conteneur de stockage pour mieux contrôler les processus physico-chimiques dans l'alvéole, tout en identifiant l'opportunité de relâcher ce second critère à terme avec l'avancée des connaissances et la précision des évaluations. A titre exploratoire, cette limite conservative est considérée en référence dans la présente étude.

Les critères de dimensionnement THM visent à maîtriser les effets hydromécaniques couplés induits à grande échelle par la température, et ainsi préserver la roche notamment vis-à-vis du risque de fracturation. Le critère principal est un critère de type Rankine en traction. Il s'agit de vérifier que la contrainte effective verticale, en intégrant le poids de la colonne de terre (de l'ordre de 500 m), exerce toujours une force de compression effective minimale sur la roche venant contrebalancer la surpression dans les pores due à la température et susceptible de fracturer la roche. Il est par ailleurs choisi d'appliquer une marge supplémentaire (de 0,5 MPa) sur cette compression effective au-delà de la contrainte limite d'apparition de la fracturation. Ceci se traduit par une contrainte effective de Terzaghi ($\sigma' = \sigma + P$, sans coefficient de Biot) de compression qui ne doit pas monter au-dessus de -0,5 MPa. Du fait de la libre déformation du massif géologique vers le haut, ce critère s'applique toujours sur la contrainte effective verticale. En plus du critère à la traction, une vérification est menée par rapport au critère plus global de Hoek and Brown. Ce second critère caractérise la rupture en cisaillement. Les critères THM actuels sont définis de manière prudente et pourront faire l'objet d'évolutions futures avec l'avancée des connaissances.

Ce sont les critères THM qui, dans la majeure partie des cas, se révèlent dimensionnants.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	80/90

5.3 Résultats d'évaluation des emprises au stockage

Comme indiqué sur la figure 29, on a retenu pour l'étude d'effectuer les calculs de dimensionnement sur la base des caractéristiques des argilites au barycentre géométrique de la ZIRA. Une étude de sensibilité a été menée selon la profondeur des couches géologiques et selon les valeurs des paramètres THM du Callovo-Oxfordien et des formations encaissantes associées à cette position.

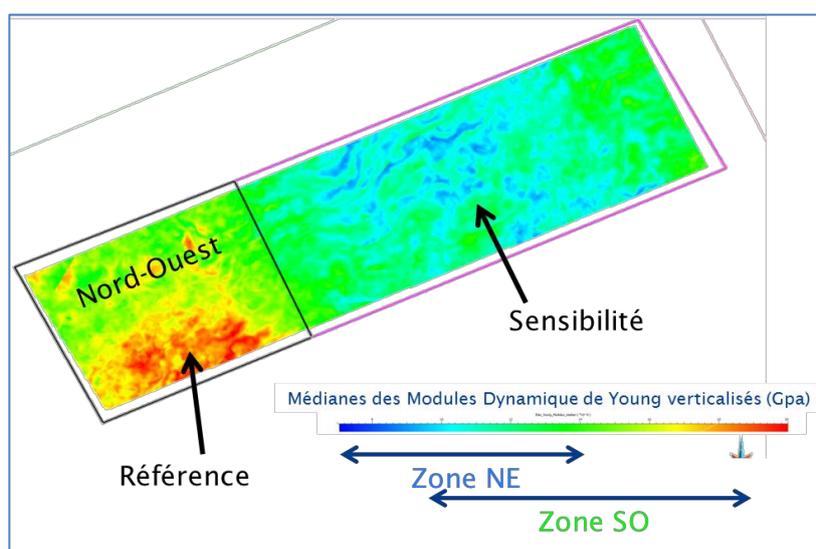


Figure 29 : découpage latéral sur la ZIRA en 3 zones avec des valeurs de paramètres THM constantes par zone (Zone Sud-Ouest considérée en référence pour cette étude)

Pour mémoire, au regard de la variabilité des paramètres THM dans la ZIRA, la position retenue pour la première série de calculs (dits « de référence ») présente un caractère conservatif avec des valeurs faibles de conductivité thermique et de perméabilité et des valeurs hautes de module d'Young. La profondeur considérée est en revanche proche de la médiane. Eu égard à ce choix de paramètres conservatifs sur la zone HA existante, étant données les incertitudes sur le choix futur d'une zone de stockage pour les déchets au-delà de ceux de la flotte actuelle, les résultats de calcul ne sont pas à utiliser de manière littérale. Ils éclairent en revanche sur les paramètres importants impactant le stockage, dans l'état actuel des connaissances.

Il est nécessaire à ce stade de mener des études de sensibilité aux paramètres puisqu'on ne sait pas aujourd'hui dans quel site et dans quelle roche seront stockés les résidus du parc du futur.

Etude de sensibilité à la profondeur

Cette étude met en évidence les éléments suivants, pour le palier D1 à 80 ans d'entreposage :

- Une augmentation de la profondeur de 30 m passant de -550 m (référence) à -580 m (sensibilité) se traduit par une diminution de la contrainte effective maximale de 0,4 MPa qui

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	81/90

peut être compensée par une diminution de l'entraxe entre alvéoles de 2,5 m soit environ - 5 % ;

- Une diminution de la profondeur de 80 m passant de -550 m (référence) à -470 m (sensibilité) se traduit par une augmentation de la contrainte effective maximale de 1,0 MPa qui peut être compensée par une augmentation de l'entraxe entre alvéoles de 8 m soit environ + 15 % ;

Pour le palier D1 à 100 ans d'entreposage, les variations relatives en % sont inchangées par rapport à une durée d'entreposage à 80 ans.

Etude de sensibilité aux paramètres de la roche argile

Cette étude met en évidence que le passage à des valeurs de paramètres plus favorables correspondant à la région Est et retenant des valeurs médianes au sein de la distribution spatiale des paramètres associée à cette région se traduit :

- Pour le palier D1 à 80 ans d'entreposage, par une diminution de la contrainte effective maximale de l'ordre de 3,5 à 4 MPa qui peut être compensée par une diminution de l'entraxe entre alvéoles de 26 m soit environ -50 % (figure 30) ;
- Pour le palier D1 à 100 ans d'entreposage, par une diminution de la contrainte effective maximale de l'ordre de 3,5 à 4 MPa qui peut être compensée par une diminution de l'entraxe entre alvéoles de 31 m soit environ -50 %.

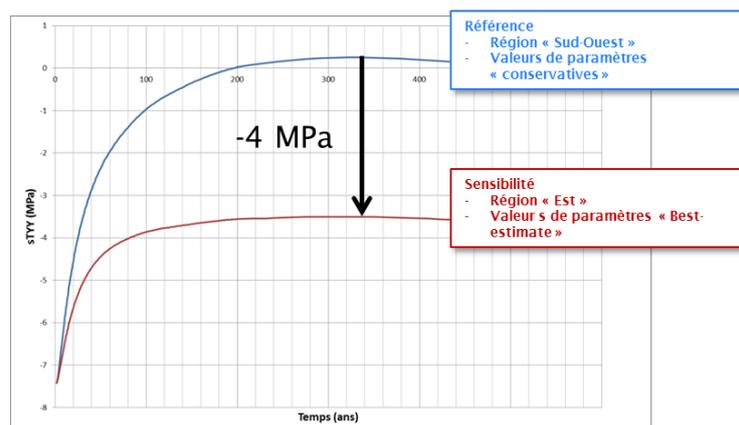


Figure 30 : Evolution de la contrainte effective selon les paramètres THM (Palier D1 – 80 ans d'entreposage)

Etude de sensibilité à la durée d'entreposage

L'évolution de l'emprise au stockage en fonction de la durée d'entreposage a été estimée pour les paliers B (80, 90, 100 ans), D1 et D2 (80, 100 ans). L'emprise des colis diminue avec l'allongement de la durée d'entreposage (tableau 16). Cette diminution est plus nette au palier D1 qu'aux paliers B ou

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	82/90

D2 qui produisent davantage de déchets HA de forte thermicité ramenés au TWh (américium dans les déchets vitrifiés lié au traitement des MOX REP).

Configuration	Palier 0	Palier A 2140	Palier B 2090		
Durée d'entreposage (an)		80	80	90	100
Puissance thermique (W/colis)		302	368	333	305
Emprise horizontale des quartiers (m ² /colis stocké)		250	395,5	385,9	371,9
N : nombre de colis par alvéole		40	28	30	36
Px (m) : entraxe entre alvéoles		57	63,6	66,5	76,9
Dy (m) : distance entre fonds d'alvéoles		30	30	30	30
Lua (m) : longueur utile de l'alvéole		142,2	142,2	142,2	142,2
Pc (m) : distance entre colis		2,02	3,62	3,26	2,43

Configuration	Palier C 2145	Palier D1		Palier D2	
Durée d'entreposage (an)	80	80	100	80	100
Puissance thermique (W/colis)	418	369	290	389	312
Emprise horizontale des quartiers (m ² /colis stocké)	409	327,5	301,9	384,8	365,1
N : nombre de colis par alvéole	28	30	38	30	36
Px (m) : entraxe entre alvéoles	66	56,4	65,9	66,3	75,5
Dy (m) : distance entre fonds d'alvéoles	30	30	30	30	30
Lua (m) : longueur utile de l'alvéole	142,2	142,2	142,2	142,2	142,2
Pc (m) : distance entre colis	3,62	3,26	2,21	3,26	2,43

Tableau 16 : emprises estimées selon la durée d'entreposage pour les paliers B, D1 et D2 (paramètres THM conservatifs)

Emprise souterraine associée à chaque palier supposé fonctionner pendant 60 ans

Déchets HA (colis de verre) : les évaluations d'emprises des déchets HA (colis de verre) associées aux paliers A, B, C, D1 et D2, exploités durant 60 ans ont été estimées pour une durée d'entreposage préalable choisie égale à 80 ans (tableau 17).

L'emprise et la surface totale les plus favorables pour les colis vitrifiés correspondent au palier A pour lequel les colis sont pauvres en actinides mineurs (contribution ²⁴¹Am) et, de ce fait, sont moins contraignants thermiquement. Ensuite vient le palier B qui conduit à des valeurs environ 50 % supérieures à celles obtenues pour le palier A. Ces premiers résultats caractérisent le stockage des déchets vitrifiés auquel s'ajoutera celui des combustibles usés (palier A en cas de non transition vers les paliers suivants).

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD00024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	83/90

Parmi les autres paliers, l'option D1 présente une emprise significativement plus faible que pour les autres paliers mettant en jeu le multi-recyclage, en raison principalement du flux de colis environ 40 % plus faible, grâce à la plus faible production d'actinides mineurs en RNR.

Les paliers C et D2 conduisent à des ordres de grandeur d'emprise et de surface voisins en raison de l'importance de deux données d'entrée, à savoir le flux annuel de colis, lui-même conditionné par le respect de la borne dite « alpha » des verres compte tenu de la présence accrue de certains radioisotopes des actinides mineurs (^{241}Am , ^{243}Am et ^{244}Cm), ainsi que la puissance thermique due essentiellement à l' ^{241}Am . Ces résultats sont la conséquence de l'accroissement de la quantité d'actinides mineurs dans les déchets, eux-mêmes issus de la plus grande quantité de combustibles MOX traités par rapport aux autres cas.

Ces conclusions restent valables pour les paliers MIX, CORAIL qui ont des ordres de grandeur d'emprise et de surface voisins de ceux des paliers C et D2, paliers présentant une proportion élevée de MOX REP.

Combustibles usés : le palier 0 ne comprend que des combustibles usés (UOx). Le palier A comprend une grande quantité de combustibles usés à forte thermicité (MOX EPR). Le palier B comprend également des combustibles usés, de moindre thermicité. Les paliers C, D1 et D2 ne comprennent pas de combustibles usés au-delà des en-cours strictement nécessaires pour les besoins du cycle. Contrairement aux études précédemment réalisées par l'Andra et le CEA dans la perspective de futurs parcs, la présente étude introduit des cas de stockage direct de combustibles usés. Cette étude pour le stockage éventuel de combustibles usés non retraités n'est toutefois raisonnablement pas assez avancée pour la présente évaluation, particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer des emprises souterraines de stockage pour des quantités importantes de combustibles usés présentant des dégagements thermiques élevés. On se limitera donc à ce stade (tableau 17) au rappel du nombre d'assemblages combustibles usés non recyclés pour chacun des paliers et de la puissance thermique à 80 ans d'entreposage d'une année complète de production. Il sera important de préciser ces emprises lors de prochaines études à mener avec l'Andra.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	84/90

Synthèse:

Paliers & scénarios	Stockage HA (colis de verre entreposés 80 ans)		Stockage Combustibles usés		
	Emprise HA avec paramètres THM médians (en m ² /TWh)	Emprise HA avec paramètres THM médians (en km ²)	Type de combustible usé	Nombre d'assemblages de combustibles usés produits sur la durée du palier (60 ans)	Puissance thermique pour 1 an de production de combustibles usés puis 80 ans d'entreposage (kW)
0	-	-	UOX	107340	550
A	165	4,1	URE MOX-REP	11400 9480	335
B	245	6,1	URE MOX-RNR	10800 12420	140
B Astrid	275	6,8	URE MOX-RNR	10800 8040	170
C	605	15,3	-	-	-
D1	340	8,6	-	-	-
D2	565	14,4	-	-	-
MIX 9,54 % URE	585	14,9	-	-	-
MIX 12 %	620	15,7	-	-	-
CORAIL	595	15,0	-	-	-

Tableau 17 : emprises estimées pour les déchets HA (colis de verre) ; nombre d'assemblages usés à stocker pour chaque option de cycle et puissance thermique associée

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	85/90

6. Conclusion

Les principaux enseignements de ces études sont les suivants.

Déploiement progressif des RNR avec multi-recyclage de l'uranium et du plutonium

Les caractérisations complémentaires menées par rapport aux études rapportées dans le *dossier 2015* (introduction d'ASTRID-600 MW (électriques) dans le calcul des flux matières en substitution d'un des trois réacteurs 1000 MW (électriques) considérés dans les études initiales) confirment que l'évolution du cycle « mono-recyclage » vers un cycle fermé conduit à améliorer, à chacune des étapes ou paliers industriels, les grandeurs caractéristiques d'une gestion durable du cycle, notamment la consommation en uranium naturel, la valorisation des matières présentes dans les combustibles usés en entreposage (MOX REP et URE) et la production de déchets ultimes. L'ensemble des caractérisations confirment l'intérêt d'une telle démarche progressive, qui permet par ailleurs d'améliorer à chaque palier la maturité industrielle des RNR et des usines du cycle associées.

La démarche progressive dont le premier palier (« palier B ») consisterait en l'introduction dans la seconde moitié de ce siècle de deux premiers réacteurs RNR en plus d'ASTRID-600 MW offrirait également un niveau de flexibilité intéressant en cas de renchérissement de la ressource uranium ou d'autres facteurs externes amenant à déployer des RNR plus rapidement que prévu.

Le cycle actuel présente d'ores et déjà les bénéfices suivants :

- Une diminution significative, de l'ordre d'un facteur 5, des volumes de déchets ;
- L'absence de plutonium dans ces déchets et donc une diminution de l'ordre d'un facteur 10 de la radiotoxicité long terme des déchets finaux comparativement au combustible usé généré par un parc fonctionnant en cycle ouvert, sans toutefois considérer la radiotoxicité du combustible usé MOX supposé être valorisé ultérieurement ;
- Le plutonium, extrait du combustible usé puis totalement recyclé, sert à produire immédiatement de l'électricité (10% de la production électrique d'origine nucléaire chaque année) ; la fraction de plutonium non fissionné reste présente et disponible dans les combustibles usés MOX pour déployer ultérieurement les réacteurs de 4^{ème} génération et produire à leur tour de l'électricité pour les générations futures ;
- Une économie actuelle de la ressource uranium venant de la mine de l'ordre de 10% par le recyclage du plutonium, auxquels peuvent s'ajouter de l'ordre de 10% supplémentaires avec le recyclage de l'uranium ;
- Une maîtrise des entreposages de combustibles usés en attente de traitement pour recyclage : les 1000 à 1100 tonnes d'assemblages UOX usés déchargés du parc chaque année sont intégralement retraitées aujourd'hui, stabilisant de facto l'inventaire à un peu plus de 10 000 tonnes. Seuls les inventaires en assemblages MOX usés et le cas échéant en assemblages URE usés augmentent aujourd'hui, au rythme d'un peu plus d'une

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	86/90

centaine de tonnes par an pour les MOX et d'un peu moins d'une centaine de tonnes pour les URE (lorsque ces dernières gestions sont mises en œuvre) ;

La constitution d'un inventaire en ressource plutonium et la maîtrise technologique du traitement recyclage peuvent constituer par ailleurs « l'assurance » pour les générations futures d'une production d'électricité souveraine, permettant de s'affranchir de tout approvisionnement en uranium de la mine. Le cycle fermé réalise pleinement les objectifs de durabilité avec l'introduction des RNR, lorsque l'évolution du marché de l'uranium justifie l'investissement dans un parc de RNR.

Multi-recyclage de l'uranium et du plutonium en REP :

Les options de multi-recyclage des matières uranium et plutonium en REP ont été analysées sous l'aspect gestion des matières et des déchets. Les résultats montrent que les concepts d'assemblages CORAIL et MIX stabilisent les inventaires de combustibles usés (y compris ceux des combustibles MOX et URE) et de plutonium. Comparé au mono-recyclage de l'uranium et du plutonium, elles réduisent le besoin de ressources en uranium naturel lorsque le recyclage de l'uranium de traitement est mis en œuvre, ce qui se traduit par un peu plus de 25 % d'économie de ressources comparé au cycle ouvert. Parmi les concepts envisagés, les concepts CORAIL (crayons MOX et crayons UOX au sein d'un même assemblage) et MIX (MOX à support uranium enrichi) sont à date les plus accessibles compte tenu du savoir-faire français acquis sur le mono-recyclage en REP. Le déploiement à l'échelle du parc pourrait s'envisager d'ici 20 à 30 ans. Les études préliminaires ne montrent pas à ce stade d'aspects rédhibitoires sur le fonctionnement des réacteurs mais ces résultats doivent être encore consolidés par des études d'ingénierie complémentaires. Pour un déploiement à l'échelle du parc, ces concepts nécessitent des réacteurs adaptés aux combustibles MIX ou CORAIL et dont le nombre varie selon le concept et la configuration d'assemblage considérée (par exemple 30% du parc pour les gestions MIX). Ils nécessitent aussi de nouvelles usines du cycle, avec notamment des capacités de gestion du plutonium triplées.

Sur les ~7 t/an de plutonium introduit dans les réacteurs MIX d'un parc supposé à l'équilibre, de l'ordre de 4,2 à 4,5 t/an d'actinides mineurs (Neptunium, Américium, Curium) sont produits selon la configuration d'assemblage et de parc considérée, soit une augmentation de ces derniers de l'ordre de 30% dans les scénarios étudiés, par rapport au mono-recyclage (3,3 t/an). A l'équilibre du parc, 45% du plutonium se transforme ainsi par captures neutroniques en actinides mineurs, les 55% complémentaires étant essentiellement fissionnés pour produire de l'énergie. Par voie de conséquence le nombre de colis de verre produits annuellement, sensible à la quantité de radio-isotopes alpha (^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm pour les principaux émetteurs) du combustible traité, augmente d'un facteur 2 (0,52 m³/TWh pour 0,26 m³/TWh en mono-recyclage) avec les hypothèses du scénario considéré dans cette étude. En revanche, si la phase de multi-recyclage en REP est suivie de la mise en œuvre d'un parc de RNR, tous les combustibles usés sont alors valorisés et les déchets conditionnés, diminuant d'autant l'emprise globale au stockage des déchets. Des optimisations supplémentaires,

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEADEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	87/90

notamment au niveau des temps de refroidissement avant traitement sont à investiguer, pour diminuer encore l'emprise au stockage.

Dans le cas d'une mise en œuvre de façon transitoire entre le mono-recyclage actuel et le déploiement des RNR, les options de multi-recyclage en REP permettent de faire progresser les procédés et la maturité industrielle des usines du cycle nécessaires au développement des RNR, les flux annuels de plutonium et de combustible MOX à l'équilibre se situant à un niveau intermédiaire entre ceux nécessaires au mono-recyclage et ceux qui seraient nécessaires pour une flotte de RNR. Des étapes de ces procédés industriels sont toutefois de TRL bas et requièrent des travaux de recherche significatifs.

Le multi-recyclage en REP dégrade la qualité du plutonium actuellement gardé en ressource pour le démarrage de la filière RNR (de l'ordre de 45% de $^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$ par exemple pour le MIX à l'équilibre, à comparer à ~50% pour un MOX usé et un peu plus de 60% pour un UOx usé). Il a la capacité de stabiliser voire de réduire l'inventaire plutonium. Un déploiement rapide de ces concepts pourrait conduire à un inventaire de plutonium inférieur à celui nécessaire à un déploiement accéléré des RNR à puissance installée constante. Ce déploiement pourrait donc être rendu délicat selon les hypothèses de scénarios, et pourrait être ralenti par manque de ressource plutonium.

Il est à noter que les performances techniques du multi-recyclage en REP en termes d'utilisation de la ressource en uranium naturel ou de production des déchets restent très en retrait des performances atteintes par des réacteurs à neutrons rapides qui demeurent l'option la plus pertinente aujourd'hui dans un objectif de fermeture du cycle. La complexification du cycle en multi-recyclage REP par rapport au mono-recyclage devra être évaluée au regard d'hypothèses de flux affinées sur les matières recyclées, de l'analyse approfondie de faisabilité industrielle et des progrès technologiques à mettre en œuvre pour les réacteurs et les usines du cycle.

Les études confiées au groupe de travail quadripartite sur la 4^{ème} génération se poursuivent en 2018 avec un scénario de déploiement en multi-recyclage en REP plus progressif que celui étudié en 2017. Ce scénario s'appuie jusqu'à l'horizon de la moitié de ce siècle sur les capacités des usines actuelles. Elles seront complétées par une analyse de la faisabilité industrielle du multi-recyclage en REP pour les aspects réacteurs, industries du cycle, transports, impact sur la production des déchets, et économiques.

Inventaire en 2016 et 2100 des matières et déchets

Les quantités de matières et de déchets sont indiquées dans les tableaux du paragraphe 4.6. La dynamique d'évolution de ces inventaires au cours de ce siècle décrite au chapitre 4 permet de mieux analyser ces quantités pour l'année 2100.

Emprises au stockage

L'emprise au stockage a été évaluée au regard notamment du critère thermo-hydro-mécanique (THM) en s'appuyant notamment sur les résultats établis par l'Andra. Contrairement aux études

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	88/90

précédemment réalisées par l'Andra et le CEA dans la perspective de futurs parcs, la présente étude introduit également des cas de stockage direct de combustibles usés. Cette étude pour le stockage éventuel de combustibles usés non retraités n'est toutefois raisonnablement pas assez avancée pour la présente évaluation, particulièrement lorsqu'il s'agit d'évaluer des emprises souterraines de stockage pour des quantités importantes de combustibles usés présentant des dégagements thermiques élevés. Cela limite les résultats de la présente étude pour les scénarios faisant appel au stockage direct de combustibles usés.

Toutefois, les évaluations d'emprise des déchets HA (colis de verre) ont pu être menées à leur terme et sont rapportées dans le présent document pour l'ensemble des options de cycle considérées (mono-recyclage, bi-recyclage, multi-recyclage en REP, multi-recyclage en RNR).

Ces études ont également permis de montrer que la thermique de l' ^{241}Am est dans presque toutes les catégories de déchets de haute activité à stocker (avec aussi dans une certaine mesure le ^{238}Pu pour les combustibles usés), l'élément déterminant pour l'estimation des emprises compte tenu de l'évolution récente des critères de dimensionnement dans une roche de type argilite et du critère thermo-hydro-mécanique en particulier. L'ordonnement au traitement des combustibles entreposés constitue une piste à investiguer, de façon à limiter la production d' ^{241}Am par décroissance radioactive du ^{241}Pu lors de l'entreposage des combustibles usés, et ainsi optimiser l'emprise au stockage.

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	89/90

Annexe 1 : Hypothèses sur les performances des réacteurs et des usines du cycle

Caractéristiques des REP (EPR) :

	EPR UOX	EPR 30% MOX	EPR 100% MOX
Origine des données	Areva	Areva	Areva
Puissance thermique (MW _{th})	4300	4300	4500
Puissance électrique nette (MW _e)	1529	1529	1600
Rendement (%)	35,6	35,6	35,6
Coefficient d'utilisation (%)	83	83	83
Masse de combustible en cœur (t _{mli})	129,0	129	124,8
Longueur de cycle (JEPP)	517	517	495
Nombre de cycles	3	3	3
Taux de combustion moyen (GWj/t)	51,8	51,8	53,5
Production électrique annuelle (TWh/an)	11,1	11,1	11,6
Durée d'irradiation (jours calendaires)	1869 (5,1 ans)	1869 (5,1 ans)	1789 (4,9 ans)
Flux moyen de combustible (t/an)	25,2	25,2	25,5

Caractéristiques des RNR (RNR-Na) :

	CFV 1000 MW _e	CFV 1450 MW _e	
		Cœur	Couvertures radiales*
Origine des données	CEA	CEA	
Puissance thermique (MW _{th})	2400	3600	
Puissance électrique nette (MW _e)	1000	1450	
Rendement (%)	41,7	40,3	
Coefficient d'utilisation (%)	83	83	
Masse de combustible fissile (t _{mli})	35,6	51,9	
Masse de combustible fertile (t _{mli})	20,6	33,8	45,4
Longueur de cycle (JEPP)	388	388	388
Nombre de cycles	5	5	10
Taux de combustion moyen (GWj/t)	83,0	81,5	
Production électrique annuelle (TWh/an)	7,3	10,6	
Durée d'irradiation (jours calendaires)	2337 (6,4 ans)	2337 (6,4 ans)	4675 (12,8 ans)
Flux moyen de combustible (t/an) (dont fissiles)	8,8 5,6	13,4 8,1	3,4

	DIFFUSION ORDINAIRE	CEA/DEN/DISN/ACF DO 19 25/10/18  18MMFD000024 diffusé le : 25/10/18 Indice 0
	Document Technique DEN	90/90

*dans l'hypothèse d'options avec couvertures radiales

Répartition des éléments lors des opérations de traitement :

	CSD-V (%)	CSD-C (%)	Recyclage (%)	Rejets (%)
U	0.1	0.02	99.88	0
Pu	0.3	0.16	99.54	0
AM (Am, Np, Cm)	99.98	0.02	0	0
PF gazeux	0	0	0	100
Iode	<1	<0.2	0	99
Tritium	0	15 (REP) / 0 (RNR)	0	85 (REP) / 1 (RNR)
C	10	0	0	90
Cl	<1	<0.2	0	98.8
PF non gazeux et PAI	99.8	0.2	0	0

La vitrification des déchets produit des colis avec les limites suivantes :

- masse de verre par colis : 400 kg ;
- teneur maximale en oxyde de PFA (PF et Actinides) : 17,5% ou 70 kg d'oxydes de PFA, Zr et particules métalliques ;
- teneur maximale en émetteurs alpha : $2 \cdot 10^{19}$ rayonnements α cumulés sur 10 000 ans par gramme de verre.