



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Le cycle du combustible nucléaire et la gestion des matières et les déchets radioactifs

L'objet de cette fiche est d'expliquer le cycle du combustible nucléaire et l'incidence des choix de politique énergétique sur la gestion des matières et les déchets radioactifs.

Les matières et les déchets radioactifs proviennent des secteurs électronucléaire, de la recherche, de la défense, des industries non électronucléaires et médial.

Les secteurs électronucléaire et de la recherche civile produisent la majorité des déchets radioactifs. Le code de l'environnement distingue :

- les matières radioactives, qui sont les substances radioactives pour lesquelles une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement ;
- les déchets radioactifs, qui sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée.

La gestion des matières et des déchets radioactifs concerne :

- les déchets déjà existant, recensés par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) dans l'inventaire national prévu par l'article L.542-12 du code de l'environnement ;
- les flux futurs de substances radioactives liés aux activités du secteur nucléaire français.

Le code de l'environnement dispose que la gestion durable des matières et des déchets radioactifs de toute nature, résultant notamment de l'exploitation ou du démantèlement d'installations utilisant des sources ou des matières radioactives, est assurée dans le respect de la protection de la santé des personnes, de la sécurité et de l'environnement.

Le cycle du combustible nucléaire

STRATEGIE FRANÇAISE EN MATIERE DE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

La France dispose d'une industrie couvrant l'ensemble du cycle du combustible nucléaire. Elle est aujourd'hui l'un des seuls pays dans le monde à maîtriser l'intégralité des technologies nécessaires au retraitement et à la réutilisation des combustibles usés, mises en œuvre dans les usines de La Hague dans la Manche et de Melox dans le Gard, qui font travailler environ 10 000 salariés.

Le cycle du combustible français repose actuellement sur la stratégie de « mono recyclage » : les combustibles usés à l'uranium enrichi sont recyclés une fois afin d'en extraire le plutonium et l'uranium, qui peuvent être réutilisés pour produire des combustibles recyclés : le MOX (actuellement utilisé dans 22 des 58 réacteurs du parc électronucléaire français) et l'uranium de retraitement enrichi (URE - utilisé

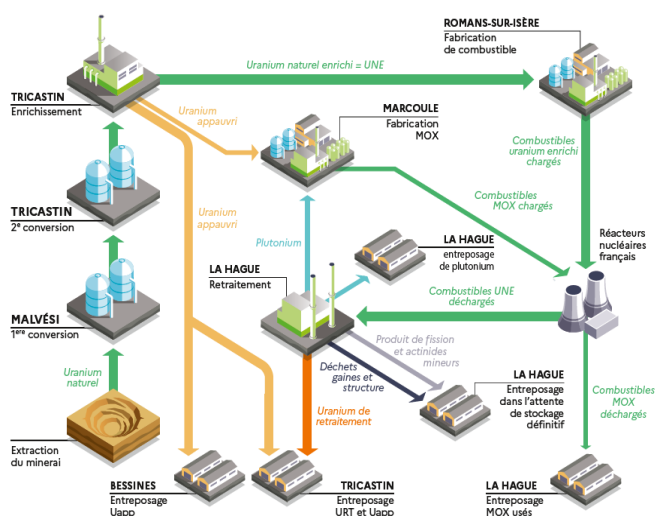


Schéma du cycle du combustible nucléaire en France

dans 4 réacteurs de la centrale de Cruas). Les combustibles MOx et URE usés sont ensuite entreposés dans l'attente d'une valorisation ultérieure.

OPTIONS EN MATIERE DE CHOIX DE CYCLE

En vue de réaliser les différents exercices prospectifs liés à la gestion des matières et des déchets radioactifs prévus par le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR), l'actuelle programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) envisage différentes options relatives au cycle du combustible, tout en disposant que la France doit poursuivre l'étude des options technologiques qui pourraient assurer la fermeture complète du cycle sur le long terme, c'est-à-dire le multi-recyclage des combustibles usés.

La PPE prévoit par ailleurs la poursuite de la stratégie française de traitement-recyclage des combustibles usés jusqu'en 2040. Les différentes options de cycle qui y sont envisagées sont les suivantes :

Le mono-recyclage

Le mono-recyclage, actuellement pratiqué par la France, permet une économie d'uranium naturel pouvant aller jusqu'à 20 à 25 %, par une valorisation des matières radioactives (uranium et plutonium) dans les combustibles MOx et URE. Il permet également une division par 4 du nombre de combustibles usés à entreposer et un conditionnement particulièrement stable des déchets ultimes. Il constitue en outre une filière économique sur laquelle la France dispose d'une compétence affirmée.

La stratégie de mono-recyclage actuellement mise en œuvre en France s'inscrit dans une perspective de fermeture complète du cycle du combustible reposant, à long terme, sur la mise en œuvre du multi-recyclage des combustibles usés dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR).

Le cycle ouvert

La politique de cycle ouvert consiste à ne pas retraiter les combustibles nucléaires usés. Les étapes de l'amont du cycle y sont identiques à celles existant dans une politique de cycle fermé, la quantité d'uranium extrait des mines étant supérieure. Après leur utilisation dans les réacteurs nucléaires, les combustibles irradiés sont entreposés en piscine afin qu'ils refroidissent pendant une période d'environ 80 ans avant d'être définitivement stockés.

Le multi recyclage

L'actuelle PPE prévoit le moxage des réacteurs de 1 300 MWe à court terme et, à moyen terme, un plan de développement du multi-recyclage en réacteurs à eau pressurisée (MRREP), en vue d'un déploiement industriel potentiel vers 2040. Une telle stratégie pourrait contribuer à la stabilisation des inventaires de plutonium et à retraiter une partie des combustibles usés qui ne l'est pas actuellement.

A plus long terme, le recyclage des combustibles MOx usés est exploré dans le cadre des recherches sur les systèmes nucléaires de quatrième génération, notamment à l'aide des RNR.

Les incidences des choix de politique énergétique sur la gestion des matières et les déchets radioactifs

Les choix en matière de politique énergétique peuvent présenter une incidence sur les choix industriels relatifs au parc de réacteurs produisant de l'énergie d'origine nucléaire ainsi qu'au cycle du combustible de ces réacteurs. L'actuelle édition du PNGMDR (2022-2026) identifie ainsi quatre scénarios prospectifs en matière de politique énergétique, en vue d'analyser leurs impacts sur les matières et les déchets radioactifs :

- **S1** : programme de nouveaux réacteurs EPR2 et politique MRREP puis fermeture du cycle avec RNR de 4^e génération ;
- **S2** : programme de nouveaux réacteurs EPR2 et politique de mono-recyclage exclusivement ;

- **S3** : programme de nouveaux réacteurs EPR2 avec arrêt du traitement recyclage ;
- **S4** : pas de nouveau programme électronucléaire.

LES INCIDENCES DES EVOLUTIONS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

Analyse en cycle de vie des options de cycle

En réponse à l'article 9 de la 4^e édition du PNGMDR, le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), EDF et Orano ont réalisé en 2018 une analyse comparée des impacts pour l'environnement du cycle actuel (mono-recyclage du seul plutonium) et d'un cycle ouvert. Cette étude a décrit ces deux scénarios en prenant en compte les usines du cycle et les installations d'entreposage intermédiaire et de stockage, ainsi que les flux de matières et de déchets.

Conformément aux demandes de l'action POL.1 de l'actuelle édition du PNGMDR (2022-2026), le CEA, EDF et Orano ont remis en 2024 au ministère chargé de l'énergie une nouvelle étude approfondissant les résultats de l'analyse en cycle de vie¹ (ACV) présentée dans l'étude de 2018. Elle compare les trois scénarios suivants de cycle du combustible nucléaire :

1. Un cycle avec traitement du combustible usé UOx et mono-recyclage du plutonium en combustible MOx mais sans recyclage de l'URT, comparable à celui pratiqué en France avant la reprise du recyclage de l'URT en combustible URE début 2024 ;
2. Un cycle avec traitement du combustible usé UOx et mono-recyclage du plutonium en combustible MOx, associé à un recyclage de l'URT en combustible URE, tel qu'il a été pratiqué en France de 1994 à 2013 dans quelques réacteurs avant de reprendre progressivement depuis fin 2023 ;
3. Un cycle dit ouvert, sans retraitement du combustible usé UOx et donc sans recyclage de matières plutonium et uranium de retraitement.

Cette étude fera l'objet d'un examen dans le cadre des travaux du PNGMDR.

Comparaison des options de cycle

De façon complémentaire à l'ACV, et conformément aux demandes de l'action POL.1 de l'actuelle édition du PNGMDR (2022-2026), le CEA, EDF et Orano ont remis en 2024 au ministère chargé de l'énergie une étude visant à traiter de l'ensemble des enjeux liés au cycle du combustible nucléaire. Cette étude s'appuie sur une analyse multicritères et multi-acteurs, dans l'objectif de s'inscrire en cohérence avec la méthodologie d'analyse appelée par l'action CHAP.1 du PNGMDR. Dans la logique des précédents travaux et des scénarios établis dans l'action POL.2 du PNGMDR, cette étude compare un scénario de poursuite du cycle actuel en mono-recyclage, un scénario de fermeture du cycle et un scénario de cycle ouvert, au regard de quatre familles de critères :

¹ La méthode de l'analyse du cycle de vie est utilisée à l'échelle internationale par la communauté scientifique, les acteurs privés et les pouvoirs politiques. Elle est encadrée par la norme ISO 14044 et constitue une méthodologie d'évaluation environnementale normée applicables à l'ensemble des secteurs économiques, reposant sur l'évaluation de 16 indicateurs techniques.

Financiers	<i>Coût de l'approvisionnement en ressource et coût de gestion des matières et des déchets</i>
	<i>Coût de R&D des centres de recherche français dans la gestion des matières et des déchets nucléaires</i>
Environnementaux	<i>Impact des activités du cycle sur la qualité des écosystèmes</i>
	<i>Emissions de GES issues des activités du cycle</i>
	<i>Consommation d'eau pour les activités du cycle</i>
Territoriaux	<i>Impacts sociaux sur le quotidien des riverains et du territoire</i>
	<i>Impacts radiologiques et chimiques sur la population et les travailleurs</i>
	<i>Externalités économiques</i>
Sociétaux	<i>Souveraineté énergétique de la France</i>
	<i>Leadership industriel et économique de la France</i>
	<i>Intérêt porté aux générations futures</i>
	<i>Risque de prolifération à partir du plutonium</i>

Les éléments de cette étude seront examinés dans le cadre des travaux du PNGMDR.

S'agissant spécifiquement des déchets générés dans les scénarios étudiés, en comparaison par rapport au cycle du combustible actuel, le volume de déchets qui seraient produits dans un fonctionnement en cycle ouvert serait :

- inférieur de 66 % pour les déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL), qui concentraient 2,67 % de la radioactivité et 2,3 % du volume de l'inventaire de déchets radioactifs à la fin de l'année 2022 ;
- supérieur de 283 % pour les déchets de haute activité (HA), qui concentraient 97,2 % de la radioactivité et 0,2 % du volume de l'inventaire de déchets radioactifs à la fin de l'année 2022 ;
- globalement supérieur de 24 % pour ce qui concerne le volume des déchets destinés à être stockés dans le centre industriel de stockage géologique en couche profonde (Cigéo) actuellement en projet.

Les travaux de l'Andra relatifs à l'inventaire prospectif de déchets pour les différents scénarios du PNGMDR

Conformément aux scénarios définis dans la PPE et repris dans l'action POL.2 du PNGMDR, l'Andra s'est attachée à présenter différentes hypothèses de volumes de déchets « à terminaison » tenant compte des options de cycle envisageables. Au regard des estimations de l'inventaire prospectif et des autres documents de planification ou de prospection, l'Andra n'identifie pas de variation volumétrique significative entre les scénarios S2, S3 et S4 pour la quantité de déchets « à terminaison ». En revanche, ces scénarios marquent une différence nette avec le scénario S1 en raison du choix du cycle, puisqu'il est le seul à rechercher la fermeture complète du cycle (multi-recyclage en REP puis RNR) à moyen terme, permettant ainsi la l'utilisation et la valorisation de certaines matières, notamment les stocks d'uranium appauvri (Uapp).

A un horizon plus court, le multi-recyclage dans les réacteurs à eau sous pression (REP) de 3ème génération pourrait permettre de stabiliser l'inventaire de plutonium ainsi que l'inventaire de combustibles usés. Les solutions de multi-recyclage du plutonium en REP nécessitent la mise au point d'un nouveau type de combustible (« MOx 2 »). L'emploi de ce type de combustible est conditionné à un programme approfondi de recherche et développement et à des études d'ingénierie. De plus, une stratégie de multi-recyclage en REP nécessiterait le développement de nouvelles infrastructures du cycle (adaptation des installations de La Hague, et de Melox).

LES INCIDENCES DES EVOLUTIONS DU PARC DE PRODUCTION D'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE

En complément des incidences liées à la stratégie de cycle du combustible, les flux de substances radioactifs afférents aux projets structurants de l'industrie nucléaire ont un impact sur l'équilibre du système de gestion des matières et des déchets radioactifs.

La poursuite du fonctionnement des réacteurs existants

La durée de fonctionnement des réacteurs électronucléaires est l'un des éléments dimensionnants de la politique énergétique française. Conçus initialement pour fonctionner au moins 40 ans, les réacteurs français n'ont pas de limite de durée de fonctionnement qui soit fixée *a priori*. Cependant, la réglementation prévoit que, tous les 10 ans, soient réexaminées les conditions de sûreté du fonctionnement de chaque réacteur. Les hypothèses de poursuite du fonctionnement des réacteurs existants ont une incidence sur les flux de matières et de déchets radioactifs.

Conformément aux dispositions de la programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2028 (PPE2), l'inventaire prospectif établi par l'Andra retient des hypothèses de durée de fonctionnement intégrant l'arrêt de 12 réacteurs de 900 MWe d'ici 2035. L'Andra a également réalisé une analyse pour évaluer la quantité de déchets qui résulterait d'une hypothèse de durée de fonctionnement de 10 années supplémentaires pour ces 12 réacteurs. L'Andra observe que l'impact de la poursuite du fonctionnement de 10 ans de 12 réacteurs sur la production de déchets ne dépasse pas quelques pour cent, et dans la plupart des cas moins de 1%, de l'inventaire des déchets à terminaison pour chaque catégorie de déchets, quel que soit le scénario considéré.

► VOLUME CONDITIONNÉ DE DÉCHETS DE FONCTIONNEMENT D'UN RÉACTEUR AU COURS D'UNE ANNÉE

Catégorie	
HA	De l'ordre de 3 m³
MA-VL	De l'ordre de 3 m³
FMA-VC	Entre 110 et 150 m³
TFA	Entre 60 et 80 m³

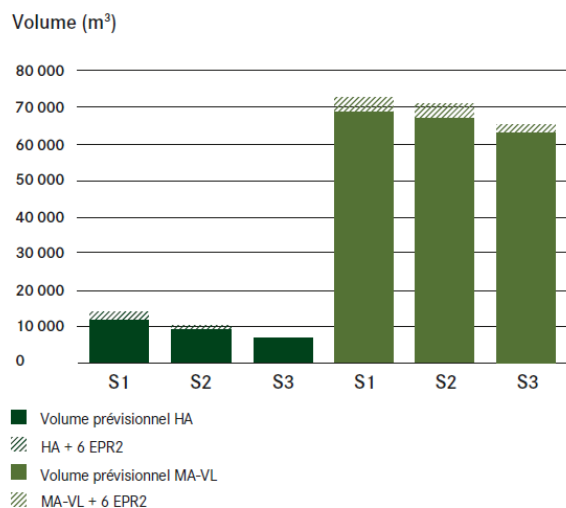
► IMPACT DES QUANTITÉS DE DÉCHETS PRODUITS PAR L'EXPLOITATION DE 12 RÉACTEURS PENDANT 10 ANS

Catégorie	
HA	Entre 2 % et 5 % suivant les scénarios
MA-VL	Inférieur à 1 %
FMA-VC	Inférieur à 1 %
TFA	Inférieur à 1 %

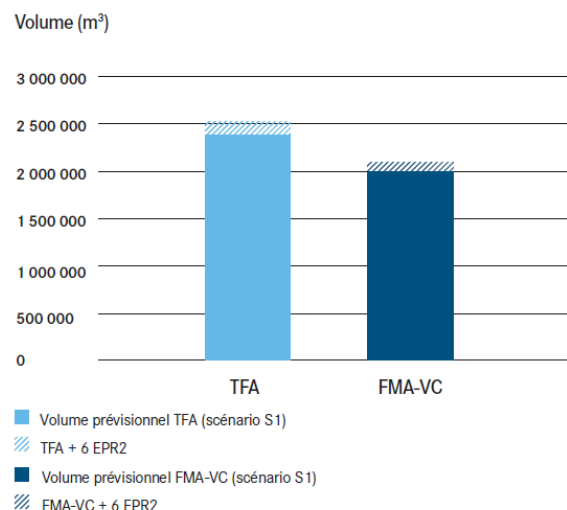
Le programme EPR2

Les déchets qui seraient produits par de nouveaux réacteurs de type EPR2 sont similaires à ceux déjà produits par le fonctionnement du parc actuel. Pour les déchets les moins radioactifs, les besoins de stockage déjà identifiés, que ce soit en matière de volume ou de capacités radiologiques et physico-chimiques, pour accueillir les déchets du parc existant ne sont pas remis en cause pour une quantité de déchets équivalent au déploiement de six réacteurs EPR2. Pour les déchets les plus radioactifs, destinés au stockage géologique profond, dans l'hypothèse de la réalisation d'un programme de six réacteurs EPR2, l'Andra n'identifie pas à ce stade d'éléments rédhibitoires à leur accueil dans le centre Cigéo actuellement en cours de développement pour les déchets du parc existant.

► VOLUMES ESTIMÉS DE DÉCHETS DES CATÉGORIES
HA ET MA-VL PRODUITS PAR L'EXPLOITATION
DE SIX RÉACTEURS DE TYPE EPR2



► VOLUMES ESTIMÉS DE DÉCHETS DES CATÉGORIES
TFA ET FMA-VC PRODUITS PAR L'EXPLOITATION
DE SIX RÉACTEURS DE TYPE EPR2



Des travaux ont été menés par l'Andra, à la demande du Gouvernement, afin d'évaluer les incidences du déploiement de 6 nouveaux réacteurs nucléaires de type EPR2 sur les politiques de gestion des matières et des déchets radioactifs. Cette évaluation a retenu l'hypothèse d'un déploiement de 6 réacteurs EPR2 par paires espacées de 4 ans à compter de l'horizon 2035, qui seraient exploités durant 60 ans.

Compte tenu des similitudes entre les réacteurs du parc actuel et les réacteurs EPR2, qui sont dans les deux cas des réacteurs à eau pressurisée, les ratios de déchets d'exploitation de faible ou de moyenne activité à vie courte (FMA-VC) et de très faible activité (TFA) produits par un réacteur de type EPR2 sont considérés identiques à ceux des réacteurs du parc actuel. Pour ce qui concerne les déchets TFA, les volumes supplémentaires générés par le déploiement des 6 réacteurs EPR2 resteraient selon l'Andra relativement faibles au regard des volumes prévus jusqu'aux années 2100 et pourraient être absorbés dans le cadre de l'exploitation du centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires), puis du futur centre de stockage des déchets de très faible activité (TFA) déjà inscrit dans le PNGMDR. En outre, l'Andra estime que ce faible surplus n'avancerait que de quelques mois (3 à 4) la saturation du Cires prévue vers 2040-2045 et n'aurait donc pas d'impact significatif sur les calendriers prévisionnels. Concernant les déchets de faible et de moyenne activité à vie courte (FMA-VC), on constate que les chroniques de livraison restent du même ordre de grandeur avec la prise en compte de nouveaux réacteurs. Sur ces bases, la saturation du Centre de stockage de l'Aube (CSA) interviendrait aux alentours de 2060, échéance peu différente de celle envisagée aujourd'hui sur le périmètre du parc actuel et avec un écart d'environ 12 mois entre les deux scénarios.

En matière de déchets de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MA-VL), destinés à être stockés en couche géologique profonde, la conception de référence du projet de centre industriel de stockage géologique profond (Cigéo) présente la capacité de pouvoir évoluer afin de prendre en compte les évolutions de la politique énergétique nationale, en particulier en matière d'inventaire de déchets à stocker.

Les développements SMR/AMR

Le développement de petits réacteurs modulaires (SMR – *Small Modular Reactors*) et de petits réacteurs innovants (AMR – *Advanced Modular Reactors*) se poursuit, notamment dans le cadre de l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » du plan France 2030. Ces projets de réacteurs sont de taille et de puissance plus faibles que celles des réacteurs actuellement en activité et font appel à différentes technologies.

L'Andra estime que les études de conception de ces projets ne sont pas suffisamment avancées pour anticiper les typologies et volumes de déchets susceptibles d'être produits par ces réacteurs. Elle considère en tout état de cause que leur développement n'est à ce stade pas structurant au premier ordre pour l'équilibre du système de gestion des matières et des déchets radioactifs. Cette appréciation sera précisée à mesure de l'avancement du développement des projets et des perspectives esquissées par les prochains appels à projets France 2030 susmentionnés.