

Énergie : des atouts à valoriser

Le traitement-recyclage des combustibles usés du nucléaire

NOTE D'ÉCLAIRAGE - FÉVRIER 2024



Think tank de référence en France et en Europe, l'Institut Montaigne est un espace de réflexion indépendant au service de l'intérêt général. Ses travaux prennent en compte les grands déterminants économiques, sociétaux, technologiques, environnementaux et géopolitiques afin de proposer des études et des débats sur les politiques publiques françaises et européennes. Il se situe à la confluence de la réflexion et de l'action, des idées et de la décision.

NOTE D'ÉCLAIRAGE - Février 2024

Énergie : des atouts à valoriser
**Le traitement-recyclage
des combustibles usés du
nucléaire**



Les notes d'éclairage de l'Institut Montaigne permettent de se situer et de rendre intelligible l'environnement dans lequel nous évoluons.

Note d'éclairage

Se situer et rendre intelligible notre environnement

Note d'enjeux

Poser des constats et identifier des problématiques

Note d'action

Formuler des recommandations opérationnelles

Opération spéciale

Sonder, chiffrer, expérimenter

Rapport

Analyser et proposer collégalement des solutions de long terme

Avant-propos 7

Introduction 8

1

La filière nucléaire en France et le cycle du combustible 9

1.1. Les opérations de traitement-recyclage 11

1.2. Le traitement-recyclage : un choix structurant de politique énergétique 14

2

L'avenir de l'aval du cycle : de l'importance du schéma industriel 18

2.1. Un premier objectif : adapter les installations existantes 19

2.2. Revenir à une approche systémique du nucléaire 22

Remerciements 26

Hugues Bernard

Hugues Bernard est chargé de projets sur les questions climatiques et environnementales à l'Institut Montaigne depuis 2022. Il est particulièrement intéressé par le financement de la transition énergétique, l'atténuation et l'adaptation du dérèglement climatique et la communication des politiques climatiques. Avant de rejoindre l'Institut Montaigne, Hugues a eu plusieurs expériences professionnelles en administration publique en France et à l'étranger. Il a notamment travaillé sur la dépollution du Gange au sein du ministère de l'Environnement Indien à New Delhi. Hugues est diplômé de la Blavatnik School of Government de l'Université d'Oxford et de l'École d'Affaires Publiques de Sciences Po Paris.

Raphaël Tavanti-Geuzimian

Raphaël Tavanti-Geuzimian est chargé de projets sur les questions économiques à l'Institut Montaigne depuis 2023. Son parcours compte plusieurs expériences en administration publique en France et à l'étranger, à l'issue desquelles il s'est spécialisé dans les sujets macroéconomiques et de politique industrielle. Il s'intéresse particulièrement aux enjeux de compétitivité des entreprises et d'autonomie stratégique. Raphaël est diplômé de l'École du Management et de l'Innovation de Sciences Po Paris.

Cette série de « Notes d'Éclairage » aborde cinq filières critiques de notre transition énergétique : l'hydroélectricité, le traitement-recyclage des combustibles usés du nucléaire, l'hydrogène bas-carbone, le biogaz et le recyclage des batteries électriques.

Ces cinq filières se situent à des degrés de maturité différents mais concourent toutes avec la même intensité à assurer notre souveraineté énergétique décarbonée. Pour certaines, il s'agit de conserver et de moderniser un atout existant, pour d'autres, de se positionner comme compétitives et viables sur la scène internationale. Pour chacune d'entre elles, un désinvestissement ou un manque d'anticipation feraient peser une menace sur la viabilité d'une politique énergétique française souveraine et ambitieuse. Les cinq filières identifiées se situent dans la même fenêtre d'opportunité : celle des décisions et de l'action politique. Considérant que certaines filières aujourd'hui critiques ont échappé hier à la vigilance des décideurs, l'ambition de ces notes d'éclairage n'est pas de formuler des recommandations mais bien d'attirer l'attention sur des arbitrages qui se présentent aujourd'hui afin de ne pas avoir à décider sous la contrainte demain.

Avec 61 GW de puissance installée, le nucléaire civil est la première source de production d'électricité en France, et s'appuie sur 56 réacteurs répartis dans tout le territoire. Il lui permet non-seulement de disposer d'un mix électrique décarboné (94 %), et d'une relative souveraineté en matière énergétique. **La France est l'une des rares nations à disposer d'une maîtrise industrielle de l'intégralité de la chaîne de valeur du nucléaire, depuis l'extraction du minerai jusqu'au traitement-recyclage du combustible usé.** Elle a choisi d'opter pour un modèle de cycle fermé, qui se distingue du cycle ouvert par le traitement des matières radioactives après leur passage en réacteur, et le recyclage d'une partie d'entre elles. Ces activités, que l'on désigne comme relevant de « l'aval du cycle », permettent de réduire l'empreinte physique des matières issues des combustibles usés, mais également leur radiotoxicité, qui revêt un enjeu d'optimisation d'autant plus critique eu égard à la superficie limitée du territoire français. Il permet au demeurant, dans une optique de souveraineté, de valoriser l'énergie des matières premières. À l'heure actuelle, 10 % de l'électricité d'origine nucléaire provient de l'utilisation du combustible MOX¹, issu du recyclage du plutonium contenu dans le combustible usé, ce qui contribue à réduire le besoin en uranium naturel.

Si la relance du nucléaire annoncée par le président de la République traite du développement de nouvelles centrales, elle ne s'est pas encore penchée sur l'aval du cycle dont le besoin de renouvellement des installations est pourtant prégnant. À plus long terme, la France ne pourra pas faire l'économie d'une approche qui prévalait pourtant à la création du parc. Celle-ci devra être intelligemment articulée entre ses besoins énergétiques, les contraintes géopolitiques, et les capacités industrielles et technologiques qu'elle souhaite mettre au service d'un *nucléaire durable*, c'est-à-dire faiblement carboné, et quasiment autonome vis-à-vis des approvisionnements en matières premières.

¹ Mélanges d'oxydes, soit un assemblage de dioxyde de plutonium, et de dioxyde d'uranium appauvri.

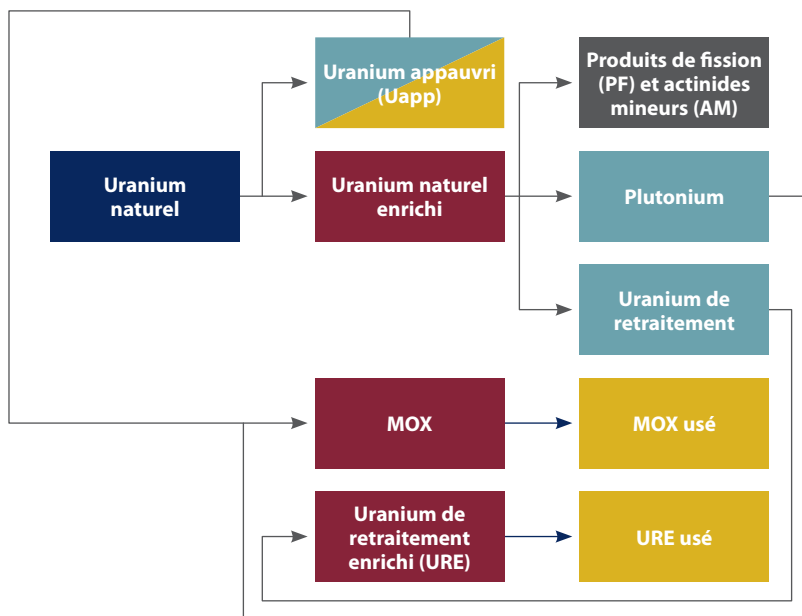
1 La filière nucléaire en France et le cycle du combustible

Grâce à d'ambitieux choix historiques, la France est l'un des rares pays au monde à s'être positionné sur l'ensemble de la chaîne de valeur nucléaire et à avoir consolidé sa maîtrise technologique et industrielle de la filière. Le nucléaire civil en France représente aujourd'hui 61 GW de capacités installées. Il s'appuie sur 56 réacteurs², relativement standardisés et répartis sur l'ensemble du territoire.

Parallèlement, la France s'est assurée une maîtrise complète du cycle du combustible, qui désigne la chaîne de valeur amont des réacteurs, depuis l'extraction minière de l'uranium (essentiellement Kazakhstan, Niger, Canada pour les actifs miniers) jusqu'à la production de combustibles alimentant les centrales nucléaires et la gestion des combustibles après usage en réacteur.

² La France exploite des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), qui composent 55 % des types de réacteurs à l'échelle mondiale.

Graphique 1 : le cycle du combustible en France



- Ressources naturelles
- Combustible nucléaire
- Matière valorisable en mono-recyclage
- Matière valorisable en RNR
- Déchets ultimes

Source : RTE.

Après leur utilisation en centrale, les combustibles usés sont d'abord déchargés puis entreposés pendant un à trois ans dans des piscines proches des réacteurs pour refroidissement, avant d'être envoyés à l'usine de la Hague (Manche).

1.1. LES OPÉRATIONS DE TRAITEMENT-RECYCLAGE

À l'issue de leur refroidissement à proximité des réacteurs, **les combustibles usés du parc électronucléaire français sont traités**, c'est-à-dire que l'on sépare les différentes matières qui en sont issues, notamment l'uranium et le plutonium, matières valorisables³ qui composent 96 % du combustible. Les 4 % restants sont **des déchets ultimes** : aucune utilisation ultérieure n'est envisagée pour eux et leur radiotoxicité est très importante. Ils **sont emprisonnés dans des matrices de verre coulées dans des colis en inox – processus dit de « vitrification » – puis entreposés dans l'attente de leur stockage définitif sur le site de CIGEO⁴**. Ces opérations sont intégralement conduites sur le **site de la Hague, ouvrage central de l'aval du cycle et opéré par Orano** depuis 1976.

Sur les 96 % de matière valorisable du combustible usé, on distingue :

- L'uranium usé (95 % du combustible), appelé uranium de retraitement⁵ (URT). L'URT peut être réutilisé, mais doit au préalable faire l'objet d'une reconversion et d'un réenrichissement (URE). L'URE a été utilisé de 1994 à 2013 par EDF dans les quatre réacteurs de la centrale de Cruas (Ardèche), et l'est de nouveau depuis 2023.
- Le plutonium, qui compose 1 % de la matière restante et dispose d'un potentiel d'énergie considérable⁶. Il est ainsi réutilisé dans un nouveau type de combustible appelé MOX. Les combustibles MOX sont fabriqués à l'usine de Melox près de Marcoule dans le Gard, également opérée par le groupe Orano et deuxième ouvrage central de l'aval du cycle. Le **combustible MOX est absolument crucial dans la stratégie française du combustible puisqu'il couvre près de 10 % des besoins annuels des réacteurs français**.

³ Pour lesquelles on peut envisager une utilisation ultérieure.

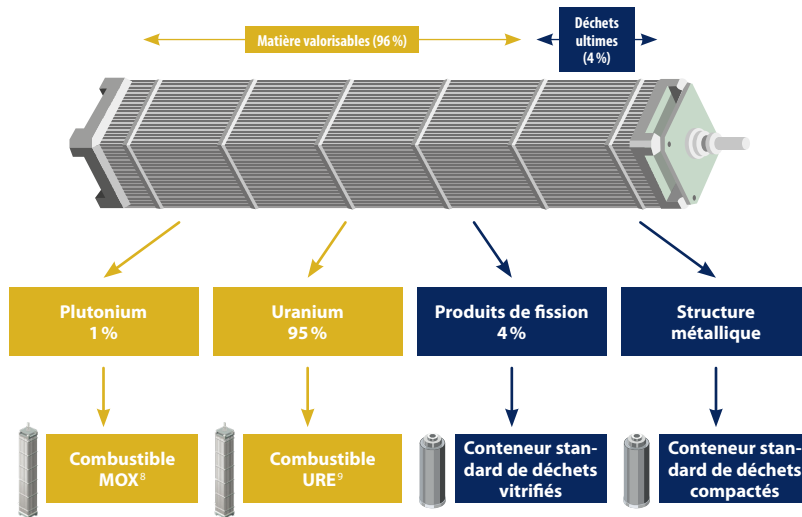
⁴ Loi de juin 2006.

⁵ Sa teneur en uranium 235 et donc son potentiel énergétique est proche de l'uranium naturel.

⁶ 1 g de plutonium (Pu) contient le même potentiel énergétique qu'une tonne de pétrole.

→ Cette méthode correspond à un système de mono-recyclage, attendu que le MOX et l'URE, qui sont issus de matières recyclées, ne peuvent être réutilisés qu'une seule fois dans les réacteurs à neutrons thermiques du parc actuel. Le MOX utilisé et l'URE utilisé, dont la France conserve d'importants stocks entreposés dans les piscines de la Hague, sont également valorisables et pourraient à terme servir de combustible pour des réacteurs de quatrième génération. Dans l'intervalle, ils pourraient également être utilisés dans le cadre d'une stratégie de multi-recyclage (MRREP) dans les futurs réacteurs EPR2.

Graphique 2 : décomposition du combustible⁷ après passage en réacteurs



Source : Orano.

⁷ Combustible de type PWR, taux moyen de combustion.

⁸ MOX : mélange d'oxydes uranium et plutonium.

⁹ Uranium de Recyclage Enrichi.

Le combustible utilisé n'est donc pas à confondre avec les déchets nucléaires, puisqu'il est en grande partie valorisable. Si la majorité des déchets est issue du parc électronucléaire français (les 4 % du combustible vitrifiés à la Hague), ils peuvent également provenir de plusieurs industries et secteurs économiques (recherche, défense, industrie non électronucléaire, secteur médical).

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) classe les déchets selon deux critères : le niveau d'activité (très faible, faible, moyen, fort) et la durée de vie (long, moyen, court). **Les déchets à vie courte** sont en majorité issus des opérations d'exploitation de maintenance et de démantèlement des installations nucléaires. Ces derniers **composent l'essentiel du volume total de déchets (± 90 %), mais ne constituent guère plus de 0,1 % de la radiotoxicité totale.** Les déchets à vie courte sont stockés dans des cellules de béton localisées sur deux sites de l'ANDRA.

CIGEO

CIGEO est un projet de site de stockage géologique situé en Meuse et en Haute-Marne piloté par l'ANDRA et qui doit accueillir les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue issus du fonctionnement du parc nucléaire existant produits en France pour une durée d'exploitation d'une centaine d'années. L'objectif de ce projet est de protéger les populations et l'environnement de la radiotoxicité des déchets, en s'adaptant aux échelles de temps long du nucléaire. Il consiste en des installations souterraines et de surfaces.

Le stockage est conçu de façon à permettre l'entreposage des déchets sur une très longue durée sans danger pour l'Homme ni la biosphère. Selon une logique de « sûreté passive », le stockage ne nécessitera pas d'intervention humaine au-delà du dépôt des colis, mais prévoit toutefois une réversibilité si les futures générations devaient se détourner de ce choix.

1.2. LE TRAITEMENT-RECYCLAGE : UN CHOIX STRUCTURANT DE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE

L'exploitation du potentiel de traitement-recyclage du combustible et sa technologie attenante relèvent d'un choix historique de l'État français, partagé dans les années 70 par la majorité des puissances nucléaires civiles. Pour un pays doté d'un petit parc électronucléaire de quelques réacteurs, il n'aurait pas été pertinent économiquement et industriellement de se doter de telles installations. **De nombreux États étrangers se sont ainsi reposés sur l'offre française et sur son usine de la Hague pour traiter les combustibles usés et conditionner les déchets ultimes.** Parmi eux, de nombreux pays européens comme l'Allemagne, la Belgique ou l'Italie. Au Japon, également un client historique, les capacités françaises ont toujours suscité beaucoup d'intérêt, poussant les autorités nippones à tenter de dupliquer l'ouvrage dans les grandes lignes au cours des années 80¹⁰.

Les États-Unis et la Suède ont à l'inverse très tôt opté pour un cycle ouvert dans lequel les combustibles sont intégralement considérés comme des déchets ultimes. La divergence d'approche selon les États relève de choix stratégiques et *in fine* politiques qui empruntent

¹⁰ Pensée sur le modèle de la Hague et construite avec l'aide d'Areva, l'usine de Rokkasho n'était en 2023 toujours pas opérationnelle près de 30 ans après son annonce. En cause, notamment, la volonté japonaise de se doter d'une technologie nationale de vitrification des déchets ultimes qui n'a jamais dépassé le stade des essais.

à plusieurs logiques. Le traitement des combustibles a longtemps fait craindre des détournements à des fins de prolifération vers le nucléaire militaire, en particulier s'agissant du plutonium, ce qui explique l'abandon des activités de traitement par les États-Unis à la fin des années 1970, sous l'administration Carter. **La France, dont le programme de dissuasion est intervenu plus tardivement que celui des États-Unis, a tout de suite pensé la convergence des programmes civils et militaires.** En l'occurrence, l'approche en cycle fermé, qui comprend les activités de traitement de combustible, lui a permis de se fournir en plutonium pour ses premières ogives et de préserver l'autonomie de sa force de dissuasion.

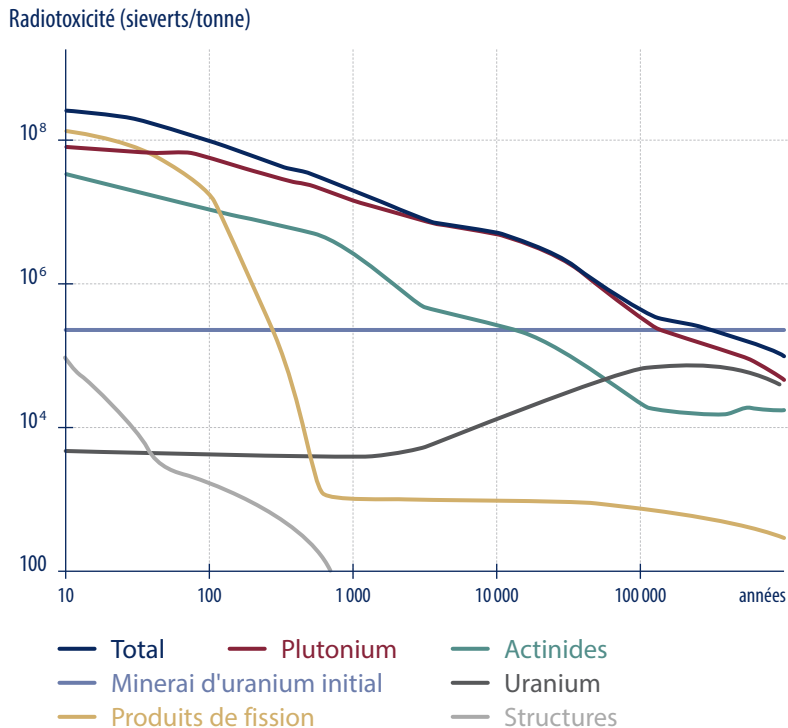
Également, le traitement-recyclage du combustible présente des bénéfices importants en matière de sûreté et de réduction du volume de déchets, renforçant par là-même l'acceptabilité auprès des populations. Pour les États-Unis, dont le territoire représente près de vingt fois celui de la France et qui offre d'importantes étendues désertiques éloignées des habitations, le traitement du combustible usé n'a jamais représenté le même impératif.

En France, les technologies de traitement-recyclage présentent les avantages suivants :

- **gain d'espace** : il permet en premier lieu de réduire le volume des déchets ultimes de haute-activité par un facteur 5. Ces déchets représentent chaque année cinq grammes par habitant en France ;
- **moindre radiotoxicité des déchets** : il contribue à réduire le taux de radiotoxicité des déchets ultimes de haute activité par un facteur 10, après la séparation du plutonium (principale source de radiotoxicité) du reste du combustible ;
- **réduction du risque** : le procédé de vitrification stabilise les déchets ultimes dans une matrice homogène et durable, tandis que dans un modèle de cycle ouvert le combustible usé – conçu pour être performant en réacteur mais non pas pour confiner des matières sur plusieurs centaines de milliers d'années – est conditionné dans un conteneur puis placé au stockage ;

- **réduction des émissions** : près de la moitié de l’empreinte carbone du cycle du combustible est liée à l’extraction minière¹¹. Mécaniquement, plus le cycle se ferme, moins il repose sur l’extraction d’uranium naturel et moins il est émetteur.

Graphique 3 : radiotoxicité (Sivert) par tonne et en fonction du temps des combustibles usés et composants



Source : CEA, 2005.

¹¹ Thomas Gibon, Álvaro Hahn Menacho, *Parametric Life Cycle Assessment of Nuclear Power for Simplified Models*, *Environ. Sci. Technol.* 2023, 57, 38, 14194–14205.

Plus encore, c’est **selon des considérations de matières que le traitement-recyclage offre le plus d’avantages**. Il agit tout d’abord comme **un outil au service de la souveraineté énergétique française et répond à des enjeux de sécurité d’approvisionnement et de gestion des matières**. Précisément, on estime dans le cas français que **les matières recyclées¹² (MOX et URE) répondraient aux besoins annuels d’environ 16 réacteurs, soit l’équivalent de 190 millions de barils de pétrole brut**.

Le parc électronucléaire français consomme environ 8 000 tonnes d’uranium naturel par an¹³, qui correspondent à 13 % de la consommation mondiale, elle-même estimée à 62 000 tonnes. **L’approvisionnement en ressources d’uranium n’est pas un problème à court-terme, puisque les réserves mondiales sont élevées et globalement assez bien réparties géographiquement¹⁴**. Cependant, la sécurité des approvisionnements pourrait ne plus être aussi évidente qu’aujourd’hui alors que se dessine un regain d’intérêt mondial pour la filière du nucléaire, en particulier au regard des avantages qu’elle confère en matière d’autonomie énergétique et de décarbonation. Lors de la COP 28 qui s’est tenue en décembre à Dubaï, 22 pays se sont engagés à tripler la capacité de nucléaire installée d’ici 2050, emportant une **hausse de la demande mondiale d’uranium, projetée à + 28 % à horizon 2030 et + 100 % à horizon 2040¹⁵**, et entraînant une augmentation des prix sans précédent depuis 2007. Le prix de l’uranium a effectivement atteint son niveau le plus élevé depuis 2007 et s’établit à plus de 92 dollars la livre en début janvier 2024. Ce phénomène s’explique aussi par **l’inélasticité de l’offre face aux chocs de demande**, qui est par ailleurs confrontée à

¹² Pour un flux de combustible usé d’environ 1 200 tonnes par an.

¹³ CEA (2015). *Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides*.

¹⁴ Selon la PPE, ce sont 4,6 millions de tonnes d’uranium (MtU) qui sont principalement répartis entre l’Australie (1,7 MtU), l’Afrique (0,9 MtU), l’Asie Centrale (0,8 MtU) et l’Amérique du Nord (0,5 MtU).

¹⁵ Reuters (2023). *Demand for uranium for reactors seen jumping 28% by 2030 – report*.

des tensions telles que le coup d'État au Niger et la baisse de la production du canadien Cameco en 2023 causée par des difficultés au niveau de ses activités minières¹⁶.

2 L'avenir de l'aval du cycle : de l'importance du schéma industriel

Le président de la République a annoncé à Belfort le 10 février 2022 son **ambition de faire de la France l'un des premiers pays au monde à sortir des énergies fossiles**. Cette ambition, en partie portée par une relance de la filière nucléaire, **ne pourra s'effectuer qu'à raison d'une politique transversale qui couvre aussi bien l'amont du cycle que l'aval, quelque peu oublié de la stratégie nationale**.

S'agissant de l'amont, d'importantes décisions ont été prises au début des années 2000, et se sont vues renforcées ces derniers mois par l'établissement d'un projet industriel visant à augmenter de 30 % les capacités d'enrichissement de l'usine Georges Besse II. **Pour l'aval du cycle en revanche, rien n'est encore acté**. Pourtant, il est **vital pour la filière de pouvoir anticiper les besoins futurs de retraitement, de stockage et d'entreposage** et donc de clarifier la stratégie de gestion du combustible¹⁷. Dès lors, la réflexion doit porter sur deux aspects :

- la **consolidation du cycle et de ses installations existantes**, à commencer par les usines de La Hague et de Melox;
- les outils les plus adaptés pour tendre vers la **fermeture du cycle, et le nucléaire durable**.

¹⁶ The Economist (2023). *Why uranium prices are soaring*.

¹⁷ RTE (2021). *Futurs Énergétiques 2050. Chapitre 12, p. 754*.

2.1. UN PREMIER OBJECTIF : ADAPTER LES INSTALLATIONS EXISTANTES

Deux impératifs à courte échéance se font jour autour des deux grands ouvrages que sont le site de La Hague et de Melox.

Concernant la Hague, l'ASN évoque un risque de saturation à l'horizon 2034, certes éloigné du débordement imminent parfois invoqué de façon excessive, mais qui **appelle dès à présent à une réflexion suivie de décisions quant au meilleur moyen d'augmenter les capacités d'entreposage**. À court-terme, plusieurs options s'avancent pour réhausser les marges d'entreposage du site :

- construction d'une piscine centralisée d'entreposage opérée par EDF sur le site à horizon 2034 et dédiée à l'entreposage de combustibles MOX et URE usés;
- densification des piscines du site avec un objectif de 30 % de gains de place;
- entreposage temporaire à sec de combustibles usés suffisamment refroidis dans des emballages de nouvelle génération;
- augmentation du nombre d'assemblages MOX neufs dans les recharges des tranches de réacteurs de 900 MW¹⁸.

Parallèlement, le **vieillessement des installations** se révèle de façon progressive, en témoigne la corrosion sur les évaporateurs des produits de fission des deux usines. Malgré toute l'efficacité des opérations, leur remplacement, lourd et délicat au regard de la sensibilité des sites, contraint l'ouvrage à fonctionner à régime réduit.

D'importantes décisions politiques s'imposent donc au regard des besoins du site. Deux orientations complémentaires se dessinent :

- la réalisation d'un grand carénage intermédiaire afin de prolonger la durée de vie de l'installation autant que techno-économiquement

¹⁸ Marie Moatti (2023). *Le combustible et son cycle : puissants leviers pour l'exploitation de long-terme*. RGN.

- possible et donner ainsi plus de marges aux programmes de R&D, forts en intensité capitalistique;
- la construction de nouvelles installations.

Une option supplémentaire, afin de sécuriser au mieux l'aval de son cycle, consisterait pour la France à examiner la possibilité de construire **une usine de conversion de l'URT en URE**, mesure est également défendue par la Commission d'enquête sur la perte de souveraineté énergétique¹⁹. Cette **capacité est aujourd'hui déléguée à la Russie**, dont les installations sont surcapacitaires. Sans être critique, elle est **constituée l'une des dépendances françaises les plus marquées le long de la chaîne de valeur**. À cet égard, le travail mené par la filière de manière générale et les propositions faites dans la SFEC/PPE 2024-2033 de lancer de premières études d'évaluation financières quant à la réinternalisation de ces capacités vers l'Europe ont jeté de bonnes bases.

Quelles que soient les options retenues, elles appellent toutes des obligations préalables.

La structuration d'un schéma industriel cohérent devra s'accompagner de plusieurs études préalables, afin d'identifier la solution la plus adéquate.

Autre grand ouvrage de l'aval du cycle, le site de Melox a également été confronté à d'importantes difficultés consécutives à une hausse des rebuts des combustibles ratés et à un changement de fournisseur en uranium appauvri, intrant dans la production de MOX. L'usine s'est ainsi vue contrainte d'opérer entre la fin des années 2010 et le début des années 2020, sous son objectif de production annuelle de MOX, fixé à 100 tonnes pour 2025. Si, aujourd'hui, les volumes retrouvent désormais des niveaux satisfaisants, ces difficultés industrielles ont durablement perturbé l'équilibre du cycle. En effet, tous les combustibles usés qui

devaient être transformés en MOX selon l'objectif annuel mais qui ne l'ont pas été faute de capacités suffisantes à Melox, sont demeurés en piscine à la Hague, contribuant à accentuer le niveau de remplissage.

Ces constats (vieillesse, saturation, équilibres...) sont autant de points d'arbitrage qui renvoient de façon lancinante à la nécessité d'une stratégie nucléaire transversale, afin de penser les outils de demain selon le nombre et le type de réacteurs dispersés à travers le territoire. **Les besoins et le dimensionnement des installations de l'aval du cycle ne sont en effet pas les mêmes selon que la stratégie énergétique retenue par la représentation nationale au terme de l'examen et du vote de la loi de souveraineté énergétique prévoit la construction de six ou quatorze EPR ou que l'uranium appauvri est requalifié comme déchet dans le cas d'un abandon définitif de la filière à neutrons rapides. De la même façon, les technologies de traitement et de recyclage devront être en mesure d'évoluer si demain le choix se déporte vers de nouveaux réacteurs et de nouveaux combustibles**, sans oublier la multiplication des réacteurs de plus petite taille.

Pour la filière nucléaire dans son ensemble, il est également **vital de ne pas laisser s'évaporer le vivier de compétences liées aux opérations de traitement-recyclage**. Le traitement-recyclage assure en effet un socle d'activités et favorise la montée en compétence des techniciens de la filière, au-delà même du tissu de sous-traitants qui comprennent les fournisseurs d'équipements ou les prestataires de services. Ces savoir-faire acquis peuvent ensuite se diffuser selon le modèle rhizomatique des technologies de pointe et, plus généralement, les métiers de la transition écologique, forts en intensité opérationnelle et exigeant une importante technicité. Le Royaume-Uni, qui avait initialement opté pour le traitement-recyclage de ses combustibles issus des centrales Magnox avec son complexe de *Sellafield*, a peu à peu perdu son vivier de compétences et n'est jamais réellement parvenu à faire fonctionner son usine SMP, qui a produit moins de dix tonnes de MOX entre 2001 et 2008. Il se retrouve aujourd'hui confronté à des difficultés majeures, tout autant

¹⁹ Proposition n° 21 de la Commission d'enquête parlementaire visant à établir les raisons de la perte souveraineté énergétique de la France, Tome 1, p. 345.

des solutions de stockage de déchets que des opérations de démantèlement. Cet exemple illustre la difficulté d'opérer de telles installations à une cadence industrielle satisfaisante.

En toile de fond de tous ces débats se pose également la question du schéma de financement, centrale au regard des importants CAPEX et cycles d'investissement que supposent les ouvrages du nucléaire. Une partie de la construction des installations de l'aval du cycle avait à l'époque été financée par les commandes des clients étrangers, selon une logique naturellement dépassée. Dès lors, **il convient d'envisager l'instruction sérieuse d'un modèle de financement pour les différents scénarios qui seront retenus, alors qu'EDF connaît des difficultés financières et que Orano ne peut guère accroître son effort financier** déjà important en faveur de la maintenance des sites. Ici encore, **une décision politique prise de concert avec l'ensemble des acteurs (EDF, Orano, APE, DGEC)** devra concevoir des solutions de financement crédibles.

2.2. REVENIR À UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DU NUCLÉAIRE

Lorsque **la France** choisit de mettre en œuvre industriellement son programme nucléaire **dans les années 70, elle identifie la fermeture du cycle comme un objectif à terme et déjà incarnée par la filière à neutrons rapides**²⁰.

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) sont des réacteurs de 4^e génération. Plusieurs types de RNR existent, mais la déclinaison la plus avancée est celle fonctionnant à caloporteur de sodium²¹, qui ralentit moins les neutrons que l'eau et offre donc une fission plus efficace. La technologie RNR présente en effet **l'avantage d'une gestion plus optimale des**

²⁰ Claire Kerboul, *De quel nucléaire avons-nous besoin ?*

²¹ Les réacteurs français privilégient le sodium comme caloporteur.

matières, puisque son combustible fonctionne à partir de plutonium et d'uranium appauvri. L'un des autres enjeux majeurs derrière le choix du traitement-recyclage pour la France était ainsi **d'accumuler des stocks** de ces deux matières en attendant de pouvoir les valoriser dans les futurs RNR. À l'époque, cette orientation stratégique **répondait surtout aux préoccupations d'indépendance énergétique et de sécurité des approvisionnements**, notamment après les chocs pétroliers.

À l'heure actuelle, les RNR n'existent guère que sous forme de démonstrateurs industriels ou prototypes de recherche dans certains pays (Chine, États-Unis, Inde, Russie). **La France a compté trois réacteurs expérimentaux** de ce type (*Rapsodie* entre 1967 et 1983, *Phénix* de 1973 à 2010, *Superphénix* de 1986 à 1996), **mais ne travaille aujourd'hui plus que par simulation**.

La filière nucléaire française souffre actuellement d'une rupture de la logique autour de laquelle elle était articulée à sa création. Dès ses premières ébauches dans les années 1960, la filière est envisagée comme allant de pair avec une **ambition industrielle transversale et une stratégie cohérente de gestion des matières énergétiques**, comprenant tout aussi bien la question du cycle, que celle de la conception et de la mise en opération des réacteurs. La **complémentarité des réacteurs et des outils du cycle du combustible, a aujourd'hui cédé le pas à une logique davantage verticale du schéma industriel nucléaire**. La cohérence d'ensemble qui prévalait hier s'est ainsi effacée au profit d'un décisionnel essentiellement centré sur les réacteurs, au détriment d'une *intendance*, en amont comme en aval du cycle, désormais tenue de suivre le rythme du parc de réacteurs. La **fermeture de la centrale de Fessenheim**, fruit d'un accord politique passé en 2011, témoigne par exemple de la dislocation du schéma de temps long en l'absence d'alternative et de réflexion transversale. L'affaiblissement de l'appréhension holistique du cycle s'est surtout bien incarné du reste, dans **l'abandon de la filière de démonstrateurs de Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR)**. Le projet ASTRID, envisagé dans les années 2010 et piloté par le CEA, ambitionnait

de reprendre les résultats des précédents démonstrateurs et de livrer un prototype de RNR au sodium pensé pour servir de premier jalon vers le passage à l'échelle industrielle. **Son abandon, acté en 2019**, est motivé par des contraintes financières en dépit d'un fort intérêt scientifique et industriel.

L'abandon de cette filière remet en cause la stratégie cohérente de gestion des matières du cycle, et témoigne en creux de la dégradation des capacités de l'État stratège, à la manœuvre dans les années 70 et capable de penser une politique industrielle cohérente sur le très long terme. Pourtant, c'est bien de long-terme dont il s'agit lorsque l'on s'intéresse au traitement-recyclage et à l'aval du cycle dans son ensemble. La notion de *nucléaire durable* recouvre un besoin quasi-nul en ressources naturelles, à la disponibilité finie et dont l'on a évoqué les tensions croissantes sur la demande. La France dispose à cet égard de centaines de milliers de tonnes d'uranium appauvri et de centaines de tonnes de plutonium (MOX usé et URE usé) qu'elle tire des décennies d'exploitation de son parc. Elle offre une réponse au défi du stockage des déchets au-delà des inventaires déjà constitués, et pour lesquels CIGEO serait alors une solution suffisante. Son fonctionnement enfin serait essentiellement décarboné, en l'absence d'extraction minière.

Sans ces prises de décision indispensables et urgentes sur l'aval du cycle, à court comme à long-terme, l'ensemble de la filière nucléaire française pourrait se trouver fragilisée, et avec elle notre modèle énergétique souverain et nos objectifs climatiques. En raisonnant de manière contrefactuelle, **la décision hypothétique de s'extraire de la stratégie de fermeture du cycle demanderait des années avant de pouvoir trouver une alternative viable.** Elle pourrait également, selon une logique extrême, s'effectuer de façon subie, comme au Royaume-Uni. Une telle situation rendrait caduc tout objectif de souveraineté énergétique et industrielle. Elle signifierait sans doute une sortie du nucléaire à terme, reléguée au rang d'énergie de transition, puisqu'un pays avec une flotte importante de réacteurs ne peut indéfiniment

multiplier les sites d'entreposage. La France se retrouverait alors privée de son outil industriel, politique et géopolitique le plus important dans la poursuite de ses objectifs souverains et climatiques : une énergie pilotable, bas-carbone et dont la sécurité d'approvisionnement serait assurée. Demain, **les insuffisances en matière de nucléaire civil déclinées à l'ensemble de la filière, dont on sait la très forte intrication avec le militaire, pourraient à terme fragiliser les outils de dissuasion française et menacer les intérêts vitaux du pays.**

Les auteurs de cette série, Hugues Bernard et Raphaël Tavanti, remercient l'ensemble de l'équipe de l'Institut Montaigne ayant contribué à sa réalisation, notamment Maxime Sbaihi, Lisa Thomas-Darbois, Martin Finet, ainsi que toutes les personnes auditionnées dans l'élaboration de ce travail.

Liste des personnes auditionnées

- **Pierre-Marie Abadie**, directeur général, Andra
- **Morgane Augé**, directrice des affaires publiques, Orano
- **Antoine-Marie Bethenod**, chargé de missions affaires publiques, Orano
- **Rémi Borel**, chef du pôle « société civile et débats », direction des affaires publiques, EDF
- **Anne Brodu**, responsable du pôle communication technique, Andra
- **Thibault Cantat**, directeur du programme carbone et économie circulaire, CEA
- **Raphaël Danino-Perraud**, officier commissionné à l'État-major des Armées et chercheur associé, IFRI
- **Mathieu De Carvalho**, responsable de la réglementation et des affaires publiques, Gas, LNG & Biogas, TotalEnergies
- **Laurent Dublanquet**, vice-président affaires européennes et internationales, Air Liquide
- **Matthieu Giard**, vice-président, Air Liquide
- **Olivier Guerrini**, directeur BU Biogas, TotalEnergies
- **Pascal Laroche**, conseiller auprès du PDG, TotalEnergies
- **Hoel Le Gallo**, *Senior Strategy Analyst*, ENGIE
- **Armand Laferrere**, *Senior Executive vice President*, Orano USA
- **Bertrand Le Thiec**, directeur des affaires publiques, EDF
- **Roland Marion**, directeur Économie Circulaire, ADEME

- **Pierre Maurin**, directeur de Projet, Veolia
- **Maxime Morand**, directeur de la stratégie et des partenariats, Verkor
- **Gilles Moreau**, co-fondateur et directeur du développement durable, Verkor
- **Jean-Michel Quilichini**, directeur de la Division Combustible Nucléaire, EDF
- **Sylvain Renouf**, directeur adjoint de la communication du site de la Hague, Orano
- **Raphaël Schellenberger**, député et président de la Commission d'enquête parlementaire sur la perte de souveraineté énergétique de la France
- **Sophie Schmidtlin**, *CTO*, The Future is NEUTRAL
- **Nicolas Tcheng**, responsable des relations institutionnelles, Renault
- **Frédéric Terrisse**, directeur général adjoint en charge des affaires publiques, ENGIE Bioz
- **Christophe Thomas**, directeur de la Stratégie et des Relations Externes, ENGIE GBU Renewables France & Europe
- **Emmanuelle Verger**, directrice EDF Hydro, EDF
- **Virginie Wasselin**, cheffe du service stratégie filière, Andra

Relecteurs

- **Benjamin Fremaux**, expert associé, Institut Montaigne
- **Cécile Maisonneuve**, experte associée, Institut Montaigne
- **Maxence Cordiez**, expert associé, Institut Montaigne
- **Joseph Delatte**, expert résident, Institut Montaigne

Les opinions exprimées dans ce rapport n'engagent ni les personnes précédemment citées ni les institutions qu'elles représentent

L'Institut Montaigne vous propose de contribuer à la réflexion sur ces enjeux afin d'élaborer collégalement des propositions au service de l'intérêt général.

Institut Montaigne
59 rue La Boétie, 75008 Paris
Tél. +33 (0)1 53 89 05 60
institutmontaigne.org

Imprimé en France
Dépôt légal : février 2024
ISSN : 1771-6756

ABB France	Crédit Agricole	Kearney	Roche
AbbVie	D'Angelin & Co.Ltd	KPMG S.A.	Rokos Capital
Accenture	Dassault Systèmes	Kyndryl	Management
Accuracy	Deloitte	La Banque Postale	Rothschild & Co
Adeo	De Pardieu Brocas	La Compagnie	RTE
ADIT	Maffei	Fruitière	Safran
Air Liquide	ECL Group	Linedata Services	Sanofi
Airbus	Edenred	Lloyds Europe	SAP France
Allen & Overy	EDF	L'Oréal	Schneider Electric
Allianz	EDHEC Business	Loxam	ServiceNow
Amazon	School	LVMH - Moët-Hennessy	Servier
Amber Capital	Ekimetrics France	- Louis Vuitton	SGS
Amundi	Engie	M.Charraire	SIER Constructeur
Antidox	EQT	MACSF	SNCF
Antin Infrastructure	ESL & Network	Mazars	SNCF Réseau
Partners	Ethique &	Média-Participations	Sodexo
ArchiMed	Développement	Mediobanca	SPVIE
Ardian	Eurogroup Consulting	Mercer	SUEZ
Arqus	FGS Global Europe	Meridiam	Tecnet Participations
AstraZeneca	Fives	Microsoft France	SARL
August Debouzy	Getlink	Mitsubishi France	Teneo
AXA	Gide Loyrette Nouel	S.A.S	The Boston Consulting
Bain & Company	Google	Moelis & Company	Group
France	Groupama	Moody's France	Tilder
Baker & McKenzie	Groupe Bel	Morgan Stanley	Tofane
BearingPoint	Groupe M6	Natixis	TotalEnergies
Bessé	Groupe Orange	Natural Grass	Unicancer
BNP Paribas	Hameur et Cie	Naval Group	Veolia
Bolloré	Henner	Nestlé	Verian
Bouygues	Hitachi Energy France	OCIRP	Verlingue
Bristol Myers Squibb	Howden France	ODDO BHF	VINCI
Brousse Vergez	HSBC Continental	Oliver Wyman	Vivendi
Brunswick	Europe	Ondra Partners	Wakam
Capgemini	IBM France	Onet	Wavestone
Capital Group	IFPASS	Optigestion	Wendel
CAREIT	Incyte Biosciences	Orano	White & Case
Carrefour	France	PAI Partners	Willis Towers Watson
Casino	Inkarn	Pelham Media	France
Chubb	Institut Mérieux	Pergamon	Zurich
CIS	International SOS	Polytane	
Cisco Systems France	Interparfums	Prodware	
Clariane	Intuitive Surgical	Publicis	
Clifford Chance	Ionis Education Group	PwC France & Maghreb	
CNP Assurances	iQo	Raise	
Cohen Amir-Aslani	ISRP	RATP	
Compagnie Plastic	Jantet Associés	RELX Group	
Omnium	Jolt Capital	Renault	
Conseil supérieur du notariat	Katalyse	Ricol Lasteyrie	
	Kea & Partners	Rivoli	

Le traitement-recyclage des combustibles nucléaires usés illustre bien l'imbrication des enjeux de préservation de l'environnement mais également de compétitivité économique et industrielle. La France est l'une des rares nations à disposer d'une maîtrise industrielle de l'intégralité de la chaîne de valeur du nucléaire, depuis l'extraction du minerai jusqu'au traitement-recyclage du combustible usé. Cela constitue un élément essentiel de sa souveraineté énergétique. Si la relance du nucléaire annoncée par le président de la République en début d'année dernière traite du développement de nouvelles centrales, elle ne s'est pas encore penchée sur l'aval du cycle dont le besoin de renouvellement des installations est pourtant prégnant. À plus long terme, l'approche française devra réaligner les réflexions portant sur le cycle du combustible et celles sur la technologie de réacteurs, matrice stratégique au lancement du parc dans les années 70. Sans celle-ci, la France risquerait de ne pas pouvoir se projeter vers le nucléaire durable, seul en mesure de nous extraire de notre dépendance à un stock de ressources naturelles fini, et de ne pas être en mesure de résoudre à long-terme l'équation des déchets.



10 €

ISSN : 1771-6756

NCL2402-02