

# LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

Source : Alain Grandjean et Farah Hariri - <http://alaingrandjean.fr>

Alors que s'ouvre le 17 avril le premier débat public sur le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), Alain Grandjean, docteur en économie de l'environnement, et Farah Hariri, docteur en physique nucléaire<sup>1</sup>, proposent, dans le document retranscrit ci-après, une solution complémentaire au stockage géologique.

Après la seconde guerre mondiale, la France débute son programme de production et de séparation de plutonium, l'objectif initial étant d'obtenir du plutonium pour le programme d'armement. Très tôt le réacteur type surgénérateur est devenu un choix stratégique. La première usine de retraitement, « l'Usine de plutonium » (UPI), a été mise en service à Marcoule en 1958 et cette même année a connu la première proposition de réacteur rapide expérimental en France, dénommé Rapsodie.

Il a fallu attendre 1978 pour dévoiler le but militaire des surgénérateurs. Dans les archives du quotidien *Le Monde*, au 19 Janvier 1978, on retrouve la fameuse déclaration du général Jean Thiry, ancien directeur d'expérimentations nucléaires du Pacifique, qui déclare que le plutonium produit dans les couvertures<sup>2</sup> des surgénérateurs est d'excellente « qualité militaire » et pourrait servir à faire des armes. Les enjeux militaires des années 50s ont donc été le fil conducteur du développement des filières nucléaires actuelles au combustible uranium-plutonium.

Nous souhaitons à travers cet article appeler à ce que la quête d'une solution durable aux déchets nucléaires soit le nouveau vecteur directeur stratégique de l'industrie nucléaire, ce qui n'est pas encore le cas à ce jour.

## La problématique des déchets

Le croisement de l'enjeu de production du plutonium avec l'enjeu de production de l'énergie a rendu l'industrie nucléaire plutôt secrète, ce qui a contribué à l'inquiétude des citoyens. Comment se débarrasser des déchets qui contiennent du plutonium et d'autres matières hautement radioactives ? C'est l'une des questions fondamentales et légitimes (avec les risques d'accident et de prolifération) qui se posent à propos du nucléaire civil. Le prochain débat relatif au PNGMDR (plan national de gestion des matières et déchets radioactifs) est une occasion de faire un point de fond sur ce sujet, en osant remettre en cause les choix faits depuis des décennies.

<sup>1</sup> Les auteurs remercient Basil Duval, physicien nucléaire, et Giovanni Porcellana, ingénieur nucléaire, pour leurs avis et commentaires sur cet article.

<sup>2</sup> Les couvertures sont des enceintes à l'intérieur du réacteur. Après irradiation en réacteur, le retraitement du combustible et des couvertures fertiles permet de récupérer les matériaux fissiles comme le plutonium produits en réacteur afin d'en faire du combustible neuf ou des armes.

## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

Quel que soit l'avenir à terme du nucléaire en France, la problématique des déchets (déjà présents ou qui seront produits dans les prochaines années) doit être correctement traitée.

La dangerosité des déchets nucléaires vient du fait qu'ils sont hautement radioactifs. Un noyau (qui est un assemblage de protons et de neutrons) est stable quand le nombre de protons est très proche du nombre de neutrons. Un noyau très loin de l'état stable (dit instable) est fortement radioactif et a besoin d'une certaine période de temps pour perdre sa radioactivité et redevenir stable. Ce processus de décroissance radioactive qui le rend stable, est engendré par la nature et s'appelle la transmutation. C'est la transmutation « naturelle ». Une fois qu'un déchet radioactif redevient stable, ce n'est plus un « déchet », ce n'est plus un « danger », il devient anodin. Il y a toute une variété de taux de radioactivité avec différentes durées (ou périodes) radioactives. Les déchets qui nous inquiètent et qui nécessitent des mesures élaborées sont ceux qui possèdent un niveau de radioactivité élevé et une durée radioactive très longue.

### Quel est alors le problème des déchets à long terme ?

Ces déchets hautement radioactifs mettent plusieurs centaines de milliers, voire millions d'années, avant de retrouver leur état « stable ». Ainsi, l'être humain, qui reste incapable de prévoir tout l'avenir sur une telle échelle de temps, s'inquiète de l'inattendu et espère rendre la radioactivité des déchets négligeable à l'échelle de temps humaine. Comment alors accélérer le processus de transmutation naturelle ? La seule façon pour rendre ces déchets anodins plus rapidement est de forcer leur décroissance radioactive par une transmutation stimulée ou accélérée par l'Homme.

En France, les critères retenus pour la classification des déchets<sup>1</sup> (et par la suite pour leur gestion), sont leur niveau de radioactivité (Haute Activité-HA, Moyenne Activité-MA, Faible Activité-FA et Très Faible Activité-TFA) et la durée de leur période radioactive (Vie Longue-VL, Vie Courte-VC et Vie Très Courte-VTC). On distingue deux composantes principales dans ces déchets :

- Les fragments de fission (4 % en masse) la plupart à vie courte. Ceux à vie longue ( $\geq 500$  ans),  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ , peuvent être détruits par capture de neutron suivie d'une désintégration rapide en atomes stables.
- Les éléments transuraniens (1,1 % en masse), le plutonium et les actinides mineurs (neptunium, américium, curium, etc.) à vie longue (de l'ordre du million d'années), peuvent être détruits par fission.

Chaque filière de réacteurs nucléaires est conçue pour recevoir un type de combustible spécifique. Et généralement la majeure partie du combustible n'est pas consommée lors de son extraction du réacteur. Le plutonium, entre autres, n'est souvent pas brûlé, ce qui n'est possible qu'avec un réacteur spécialement conçu pour le faire. Économiquement il est rentable de tirer parti de ce combustible utilisé et c'est pour cela qu'on sépare le plus tôt possible les matières « valorisables » (qu'on peut réutiliser après un retraitement) de celles qui ne le sont pas. Par conséquent, le combustible utilisé qui contient les fragments de fission, le plutonium et les actinides mineurs, peut être uniquement vu comme un produit dangereux dont il faut juste se débarrasser, ou comme quelque chose dont on peut tirer parti. C'est ce qui explique qu'il y a des stratégies contrastées pour la gestion des combustibles usés.

- i. Entreposage : tout le monde est d'accord qu'il faut commencer par l'entreposage (mettre à l'abri et attendre que la radioactivité décroisse) ce qui permet d'attendre et de réfléchir sur les décisions à prendre pour gérer ce combustible usé de la meilleure façon éthique et économique. Il y a différents types d'entreposage: entreposage à sec, piscines de combustibles usés, verres...
- ii. Stockage direct : développer sous terre pour stocker d'une façon définitive le combustible usé. C'est en France le but du projet Cigéo de centre de stockage à 500 m dans une couche d'argile (notamment pour les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue).

<sup>1</sup> Voir l'inventaire de l'ANDRA, [https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/inventaire\\_national-essentiels-2019.pdf](https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/inventaire_national-essentiels-2019.pdf)

**LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?**

- iii. Recyclage ou multi-recyclage : trier, dissoudre et extraire sélectivement du combustible utilisé les composés valorisables. Quand le combustible sort du réacteur on commence par l'entreposer dans une piscine pour évacuer la chaleur qu'il dégage. Ensuite on sépare les éléments qu'on va recycler des autres éléments qu'on considère comme déchets ultimes et avec les éléments qu'on va recycler on va refaire du combustible (via le MOX, Mixed OXides fuel, combustible à base d'uranium et de plutonium).  
En France ces déchets ne sont recyclés à ce jour qu'une fois car la qualité des isotopes de plutonium et d'uranium après ce recyclage n'est plus adaptée au fonctionnement des réacteurs actuels<sup>1</sup> (REP) de « deuxième génération ». Afin d'effectuer un multi-recyclage de ces matières dans ces REP, une manipulation du plutonium dégradé est nécessaire (en le mélangeant avec de l'uranium enrichi). Gardons en tête que ces REP ne sont pas conçus pour recevoir ce type de combustible, ce qui implique des limitations de sûreté associées au fonctionnement du réacteur. Les techniques pour faire cette manipulation ne sont pas encore démontrées à l'échelle industrielle. Autrement, ces matières-là attendent un multi-recyclage dans les futures générations de réacteurs à neutrons rapides conçus pour accepter ce type de combustible.
- iv. Transmutation : La transmutation « accélérée » est la transformation d'un radionucléide (isotope radioactif d'un élément) en un autre par irradiation. Elle résulte de son bombardement par une source de neutrons permettant de réduire sa radiotoxicité plus rapidement que prévu par la nature. Ainsi la transmutation des actinides et de certains produits de fission à vie longue pourrait atténuer la radiotoxicité des déchets de haute activité et permettrait de réduire considérablement l'impact environnemental de l'enfouissement géologique profond (en réduisant les volumes d'un facteur 100 et surtout le temps de stockage d'un facteur 1 000). La transmutation améliorerait donc « la propreté radiologique » de l'énergie nucléaire et permettrait de satisfaire l'une des conditions majeures pour que le système soit plus respectueux de l'environnement. La transmutation est aussi une source d'énergie nucléaire par elle-même, elle permet non seulement de « nettoyer » le combustible irradié, mais aussi de générer plus d'énergie. Ce procédé peut se faire de différentes façons : au sein même d'un réacteur à neutrons rapides ou d'un réacteur sous-critique<sup>2</sup> (neutrons produits par une source externe).

**La stratégie française : une impasse**

La stratégie de la France poursuivie depuis l'après-guerre et entérinée par la loi Bataille<sup>3</sup>, peut se résumer en quelques mots : recourir à une boucle de recyclage (via le MOX), stocker en profondeur (maintenant à Cigéo) les déchets à haute activité à vie longue et se focaliser sur le futur déploiement des réacteurs dits de génération IV (abrégé par GEN4 dans la suite) à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) du type d'Astrid<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Les réacteurs du parc nucléaire français sont dits de deuxième génération (GEN2). Ce sont des réacteurs à eau pressurisée (REP). La troisième génération (l'EPR) dont un réacteur est en cours de construction à Flamanville est aussi à eau pressurisée, mais son cahier des charges intègre des contraintes de sûreté et de sécurité beaucoup plus fortes.

<sup>2</sup> Contrairement aux réacteurs critiques, les réacteurs sous-critiques sont des installations hybrides où on couple un réacteur à une source de neutrons externe. Il est alors possible d'arrêter la source de neutrons externe pour arrêter le réacteur.

<sup>3</sup> Plus précisément, suite au rapport de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques sur l'état d'avancement et les perspectives des recherches sur la gestion des déchets radioactifs, constatant les retards pris dans ce domaine, deux nouvelles lois sont adoptées 15 ans après la loi Bataille : Loi n°2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire. Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs.

Sur les trois axes de recherche stipulés par la loi Bataille, seul l'enfouissement profond semble avoir été retenu, comme le souligne en 2011 l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, dans son rapport sur l'Avenir de la Filière Nucléaire en France, qui conclut que la transmutation se ferait par les réacteurs rapides de génération 4.

<sup>4</sup> Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration. C'est un surgénérateur comme Superphénix, qui a été abandonné en France en 1997. Voir <https://fr.wikipedia.org/wiki/Superph%C3%A9nix>

## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

Mais ce dernier volet est maintenant reporté. Le projet Astrid lancé en 2009 est arrêté<sup>1</sup>, même si cette décision n'est pas encore officialisée.

Cette stratégie (même si elle est en partie remise en cause), souvent présentée comme bouclant le cycle de traitement des déchets nucléaires, n'y parvient pas réellement dans les faits. Les réacteurs actuels ne sont pas faits pour brûler les déchets à vie longue car il s'agit d'éléments qui ne fissionnent pas dans un flux de neutrons thermiques. Même si les réacteurs de GEN4, conçus pour avoir un flux de neutrons rapides, peuvent détruire une partie des déchets (seulement le plutonium), ils ne permettent pas de réduire le temps d'enfouissement des déchets, car ils ne réduisent pas la quantité d'actinides mineurs. Et ce pour des raisons liées aux contraintes de sûreté du système (en termes techniques, la limite est due à l'effet de vidange) : l'introduction de plutonium et d'actinides mineurs en grande quantité dans un réacteur GEN4 refroidi au sodium a un impact négatif sur la sûreté du réacteur, car toutes les marges de sûreté sont dégradées. De plus, le déploiement de tels réacteurs impliquerait de gérer de très grandes quantités de plutonium, engendrant des risques de prolifération du fait des transports accrus et de la nécessité d'augmenter considérablement la capacité de retraitement à la Hague.

À moyen terme, l'État semble aujourd'hui privilégier le choix de passer au multi-recyclage dans les REP. Avec l'objectif de réduction à 50 % du nucléaire<sup>2</sup> dans la part de la production électrique, et du fait que les réacteurs à neutrons rapides sont loin d'être mis en place, s'ils le sont un jour, la réduction de l'inventaire de plutonium se ferait donc d'ici jusqu'à environ 2050 via un recyclage du MOX dans les REP. Cette stratégie produira, au passage, une quantité considérable d'actinides mineurs en plus (et par la suite augmentera la quantité de déchets à vitrifier pour Cigéo). La qualité du plutonium qu'on trouve dans le MOX usé est dégradée et ne peut être recyclée qu'à travers des techniques avancées non démontrées à l'échelle industrielle. Enfin, le multi-recyclage dans les REP nécessitera de manipuler une quantité plus importante de plutonium dans les installations du cycle.

Cette stratégie nous conduit donc à stocker, manipuler et transporter de plus en plus de plutonium tous les ans, générant ainsi une véritable « économie du plutonium ». Les inconvénients y sont majeurs pour une France qui détient, en 2016, 81,7 tonnes de plutonium séparé ou présent dans du combustible MOX non irradié et 287,8 tonnes de plutonium contenu dans du combustible irradié<sup>3</sup>. Insistons sur 6 des inconvénients les plus notables.

1. Dans l'idée de faire du multi-recyclage du plutonium, il faut par la suite augmenter la capacité de retraitement à la Hague ou construire de nouvelles usines. En France, le plutonium est recyclé une fois en MOX à travers le processus Purex : 9,2 tonnes sont déclarées par la France comme « engagées » dans le processus de fabrication des assemblages MOX et le stock de plutonium dans les combustibles MOX usés s'accroît d'environ 7 tonnes par an dans le cycle actuel<sup>4</sup>. L'étape intermédiaire qui consiste à les utiliser dans les REP actuels, conduit alors à devoir gérer et manipuler des quantités de plutonium encore plus importantes, comme l'on a dit plus haut, sachant que le multi-recyclage du plutonium dégrade la qualité du plutonium et nécessite d'augmenter sa teneur, ce qui dégrade les coefficients de sûreté.

<sup>1</sup> Voir le rapport de consultation de la PPE. Page 129.

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Projet%20PPE%20pour%20consultation.pdf>

« Jusqu'à présent, les efforts de recherche s'étaient focalisés sur le déploiement de la filière des réacteurs à neutrons rapides de génération IV refroidis au sodium (RNR). Dans le cadre de la loi sur la gestion des matières et des déchets radioactifs de 2006, des études de conception d'un démonstrateur technologique de RNR, nommé ASTRID, avaient été lancées en 2010. Les études se poursuivent actuellement avec une phase de conception détaillée sur la période 2016-2019. Pour autant, dans la mesure où les ressources en uranium naturel sont abondantes et disponibles à bas prix, au moins jusqu'à la deuxième moitié du 21<sup>ème</sup> siècle, le besoin d'un démonstrateur et le déploiement de RNR ne sont pas utiles avant cet horizon. »

<sup>2</sup> Contrairement à l'intuition la réduction du parc augmentera aussi l'inventaire des déchets. En effet la seule option pour réduire le stock de MOX est de faire du multi-recyclage dans les réacteurs actuels ce qui conduira à plus de séparation et de retraitement à la Hague et à plus de piscines de refroidissement pour entreposer les déchets. À court terme, si on réduit l'inventaire de plutonium via un recyclage du MOX dans les REP actuels, on produira environ 30 % d'actinides mineurs en plus. En effet, ces réacteurs produisent énormément d'américium qui est un actinide, en particulier quand ils consomment du MOX.

<sup>3</sup> Voir le Rapport du Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire, 27 Juillet 2018

<sup>4</sup> Id.

## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

2. Les capacités d'entreposage pour refroidissement sont saturées par le MOX usé qui n'est pas retraité. Étant donnée la perspective de saturation des capacités d'entreposage de combustibles usés entre 2025 et 2030<sup>1</sup>, les besoins d'entreposage du MOX usé sont croissants en l'attente (lointaine...) de la GEN4 ou de réacteurs 1 300 MWe « Moxés<sup>2</sup> ». Il faudra donc accroître le volume de « piscines » de refroidissement, chose non-souhaitable vu ses inconvénients en matière de sûreté des transports et de vulnérabilité face aux risques d'accidents et autres incidents.
3. Le problème lié aux actinides mineurs n'est pas réglé. À court terme, l'inventaire d'actinides mineurs augmenterait avec le multi-recyclage dans les REP actuels (en particulier la quantité d'américium 241, très radiotoxique). Sur le long terme, ceux-là ne seraient brûlés qu'en petites quantités dans les réacteurs à neutrons rapides au sodium (RNR-Na). Même si ces derniers pourraient efficacement consommer le plutonium, l'inventaire d'américium ne serait réduit que si les RNR-Na passaient le seuil des 50 % dans le parc<sup>3</sup>, ce qui n'est pas probable<sup>4</sup> avant plusieurs décennies.
4. Jusqu'à présent, les efforts de recherche se sont focalisés sur le déploiement de la filière des réacteurs à neutrons rapides de GEN4 refroidis au sodium (RNR-Na). Tous les réacteurs produisent du plutonium, mais les surgénérateurs (contenant un combustible surchargé en plutonium) intensifieraient sa production et nécessiteraient par la suite un multi-recyclage du plutonium et sa séparation des produits de fission dans le combustible usé. Dans un parc de RNR-Na c'est le plutonium qui est à l'origine de la production d'énergie et non pas l'uranium 235 comme dans les réacteurs à eau pressurisée. De plus, dans ce type de réacteur où le modérateur est absent, l'alimentation initiale en combustible doit contenir une teneur en plutonium supérieur à 15 %. Le déploiement de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium impliquerait donc de gérer de très grandes quantités de plutonium.
5. Le coût du projet Cigéo est évalué de manière assez arbitraire à 25 milliards d'euros aujourd'hui. Il est difficile de croire que ce budget sera tenu<sup>5</sup> ce qui n'arrive quasiment jamais pour des opérations de cette ampleur, sans précédent.
6. Enfin, cette stratégie repose sur un cycle de combustible Uranium-Plutonium (U-Pu) longtemps privilégié par les efforts de recherche en France et par l'intérêt du déploiement des RNR-Na qui est aujourd'hui remis en cause, comme on l'a dit. Le risque d'impasse est donc réel. L'idée d'utiliser un spectre « rapide » de neutrons est légitime et permet d'utiliser le combustible plus longtemps. Un flux de neutrons rapides minimise la production des déchets et permet de les éliminer par fission. Mais les RNR peuvent reposer sur un autre cycle de combustible qui n'utilise pas le plutonium car il faut non seulement éliminer les éléments transuraniens par fission mais aussi s'assurer qu'en le faisant on n'en produit pas de nouveaux en plus grande quantité.

## Comment alors sortir de l'économie du plutonium ?

### Il est encore temps de lancer des solutions complémentaires à Cigéo

Il est encore temps de chercher des solutions complémentaires nouvelles pour réduire l'emprise du stockage géologique, car le projet Cigéo va se déployer sur un temps très long ce qui permet de mettre au point de nouvelles options: les premiers colis de haute activité ne seront pas chargés à Cigéo avant 2070<sup>6</sup>. Les décisions prises sur ce sujet en 1991 et actées dans la loi Bataille peuvent et doivent être

<sup>1</sup> Id.

<sup>2</sup> Ces REP, les plus récents, ne sont pas à ce stade fait pour utiliser du MOX. Il faut donc les transformer si on veut le faire.

<sup>3</sup> Voir le rapport du CEA sur la stratégie de consommation d'actinides mineurs,

Tome 2 : <http://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiqués/institutionnel/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires.aspx>.

<sup>4</sup> L'arrêt d'Astrid ne signifie pas nécessairement celui de la GEN4, mais la rend clairement très lointaine.

<sup>5</sup> L'Andra l'avait estimé à 34,5 milliards d'euros.

Voir <https://www.actu-environnement.com/ae/news/cout-cigeo-conseil-etat-stockage-dechets-nucleaires-30889.php4>

<sup>6</sup> Voir le rapport d'évaluation de l'IRSN sur Cigéo où on trouve le calendrier page 47/241, section 2.4

[https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports\\_gp/gp-dechets/Pages/GPD-GPU\\_DOS-Cigeo\\_072017.aspx#.XKsM7j1OKUL](https://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/gp-dechets/Pages/GPD-GPU_DOS-Cigeo_072017.aspx#.XKsM7j1OKUL)

**LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?**

réévaluées pour lancer, en parallèle au stockage géologique profond, des projets alternatifs de transmutation. L'idée n'est pas de se passer totalement du stockage géologique, qui restera de toute façon nécessaire (notamment pour les produits de fission difficiles à transmuter), mais de réduire la radiotoxicité et le dégagement thermique des colis stockés à long terme, ce qui permet de réduire considérablement le volume et le temps de stockage. La France a certes déjà conduit d'énormes efforts sur la transmutation. Mais ces efforts-là ont été très focalisés sur les RNR-Na. Le statut de la transmutation aujourd'hui est donc fortement influencé par l'horizon privilégié, encore récemment, d'un futur parc avec des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, dont on vient de voir qu'il est reporté « aux calendes grecques ». Or, il existe d'autres voies de transmutation insuffisamment explorées.

**La Transmutation pour rendre les déchets radioactifs anodins**

Toute la question de la transmutation réside dans deux choix : la technologie de séparation des déchets et la source de neutrons à disposition.

Pour qu'elle soit efficace, la transmutation requiert une étape préalable qui est la séparation ou le tri des déchets. Le but principal du retraitement aujourd'hui est d'extraire et de séparer le plutonium des actinides mineurs. Et la technologie utilisée à grande échelle (par exemple à la Hague) est le procédé « humide » Purex<sup>1</sup>. Pour améliorer le retraitement des combustibles usés, il existe des traitements alternatifs plus simples, pouvant être réalisés sur le site de la centrale et ayant un impact moindre sur l'environnement, comme les procédés pyro-électriques, développés aux États-Unis<sup>2</sup>. Contrairement à Purex, ces procédés à sec présentent l'avantage de ne traiter à aucun moment de manière séparée l'uranium et le plutonium. Ils sont donc plus sûrs en matière de prolifération et permettent d'éviter ainsi de longues périodes d'entreposage et de nombreux transports.

Ensuite, pour transmuter des éléments, il faut disposer d'une source de neutrons suffisamment intenses qui peut être produite par le système même (à l'intérieur d'un réacteur rapide) ou par une source externe (ce qu'on appelle système hybride).

Les sources externes ne sont, à ce jour, pas suffisamment explorées. Une première voie consisterait à utiliser un tokamak sphérique de petite taille, type « fusor<sup>3</sup> », qui n'a pas comme but la production de l'énergie mais constitue un moyen pour produire des neutrons à travers la fusion nucléaire. Ce type de machines est très prometteur grâce à la supraconductivité à haute température qui se dévoile comme un « game changer » pour la taille et le coût des machines basées sur la fusion nucléaire. Elles sont actuellement en développement aux États-Unis<sup>4</sup> et en Angleterre<sup>5</sup>.

La transmutation pourrait aussi se faire en utilisant des dispositifs de fusion par confinement inertiel qui utilise la technologie du laser pour produire un flux de neutrons (par exemple les études scientifiques menées par le prix Nobel de physique Gérard Mourou autour de l'interaction du laser avec la matière<sup>6</sup>).

Enfin, une voie déjà mature correspond à la création de neutrons par l'intermédiaire des accélérateurs de particules<sup>7</sup>. Ces techniques marchent bien avec un cycle uranium-plutonium, mais pour que la transmutation soit suffisamment efficace, il faudrait explorer l'avantage du Thorium (Th) dans un flux de neutrons rapides. La France ne s'est jusqu'à présent pas beaucoup intéressée à ce sujet mais le thorium pourrait être un chemin alternatif à investiguer pour sortir de l'économie du plutonium.

<sup>1</sup> Voir <http://www.cea.fr/Documents/monographies/Proc%C3%A9d%C3%A9-PUREX.pdf>

<sup>2</sup> Voir Argonne National Laboratory: [https://www.ne.anl.gov/pdfs/12\\_Pyroprocessing\\_bro\\_5\\_12\\_v14%5b6%5d.pdf](https://www.ne.anl.gov/pdfs/12_Pyroprocessing_bro_5_12_v14%5b6%5d.pdf)

<sup>3</sup> Voir <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusor>

<sup>4</sup> Projet SPARC au MIT, voir <https://www.psfc.mit.edu/sparc>

<sup>5</sup> Projet STEP, voir <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2017.0439> et <https://www.tokamakenergy.co.uk>.

<sup>6</sup> Voir « The Extreme Light Infrastructure » <https://www.osapublishing.org/opn/abstract.cfm?uri=opn-22-7-47> <https://doi.org/10.1088/0741-3335/49/12B/S61>

<sup>7</sup> Projet Myrrha en Belgique, [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00164-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00164-4).

## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

Si ces technologies ne sont pas encore toutes matures, on a encore au moins 50 ans devant nous pour explorer ces voies-là avant que les premiers colis de haute activité ne soient chargés à Cigéo. Pourquoi alors ne pas porter la problématique d'incinération<sup>1</sup> des déchets pour générer de l'innovation et pousser les limites de la technologie ? Pourquoi ne pas encourager les programmes de recherche dans cette direction ?

### Notre Projet

Au niveau mondial, la France placée au 2<sup>ème</sup> rang après les États-Unis, détient 58 réacteurs en 2018 tous de la filière REP. Au niveau européen, la France est donc la mieux placée pour reprendre le leadership sur le sujet des déchets nucléaires. De la même façon que les filières actuelles sont un héritage du développement d'applications militaires des années 1950, aujourd'hui, nous souhaitons que la destruction des déchets nucléaires soit le fil conducteur et la motivation principale vers l'innovation dans le domaine du nucléaire afin de résoudre les problèmes accumulés à ce jour. A la veille des élections européennes, la France peut jouer le rôle de catalyseur. Il est essentiel de fédérer les efforts européens autour du sujet de la transmutation des déchets.

À cette fin, nous proposons la création d'un centre européen de recherche, à l'image du CERN, dédié à la transmutation (qui peut être basé sur une reconversion d'un site nucléaire préexistant). Ce site aura comme but de démontrer la capacité d'incinérer (c.à.d. brûler les déchets par transmutation) et de séparer des déchets nucléaires à l'échelle industrielle. Donc la construction d'un premier démonstrateur industriel de « brûleur de déchets » nécessaire à la fermeture du cycle de combustible actuel (*voir schémas 1 et 2*). Le point de départ sera l'étude de faisabilité et d'efficacité d'installations d'irradiation par différentes sources de neutrons intenses en considérant différents scénarios possibles (brûleur au thorium, tokamak sphérique type fusor, cyclotron, laser, etc.).

Une telle plateforme d'échanges d'expériences est nécessaire, et permettrait de rassembler tous les efforts qui sont faits en terme de modélisation, expérimentation dans tous les domaines de la physique (fission, fusion, physique des accélérateurs, physique des lasers, etc.) et de production industrielle.

Un tel centre de recherche appliquée mettra l'industrie au cœur du jeu pour transmuter les déchets, permettant ainsi aux industriels européens de se positionner comme leaders mondiaux dans ce domaine.

### Moyens

Pour lancer cette idée nous proposons que soit montée en 2020 une conférence internationale dédiée à la transmutation des déchets en France afin de monter un réseau international « connecté » sur le sujet. Seront invités tous les acteurs académiques et industriels impliqués dans la transmutation des déchets, pour identifier la ou les voies les plus prometteuses pour amorcer ce projet. Une première étape essentielle qui résultera de cette conférence sera la rédaction d'une feuille de route pour la construction de ce centre.

Sur le long terme, cette initiative permettra la constitution d'un écosystème de compétences et de connaissances dans le domaine de la transmutation industrielle qui commence à établir les bases et à préparer les futures générations pour faire face aux défis de ce secteur.

### Conclusion

En conclusion, la problématique des déchets nucléaires se situe dans un contexte politique sensible et présente des contraintes techniques qui nécessitent des développements et une coopération au niveau mondial. Il importe que soient explorées toutes les voies permettant d'accélérer le processus de transmutation naturel afin de rendre plus rapidement les déchets radioactifs de vie longue « anodins ». Nous souhaitons que cet enjeu nous rassemble en Europe, et soit le nouveau vecteur directeur vers l'innovation dans notre utilisation du nucléaire.

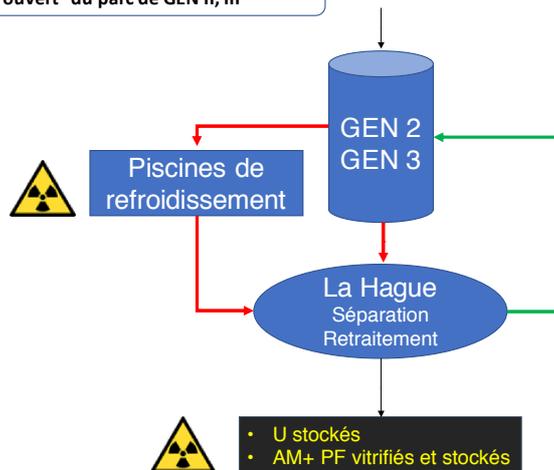
<sup>1</sup> La transmutation est une incinération.

## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : COMMENT SORTIR DE L'ÉCONOMIE DU PLUTONIUM ?

## Schéma 1

Illustration du cycle de combustible avec la stratégie envisagée par la France. Les combustibles usés font l'objet de deux entreposages successifs dans l'attente de leur retraitement à la Hague. Le premier près des réacteurs dans des piscines dites BK avant de pouvoir être transportés. Le deuxième se fait à la Hague pour refroidissement complémentaire avant retraitement éventuel. Le plutonium est extrait du combustible usé pour être recyclé et réutilisé (flèche verte). À l'issue du retraitement des combustibles usés, restent les actinides mineurs (AM) et les produits de fission (PF) qui sont vitrifiés et stockés.

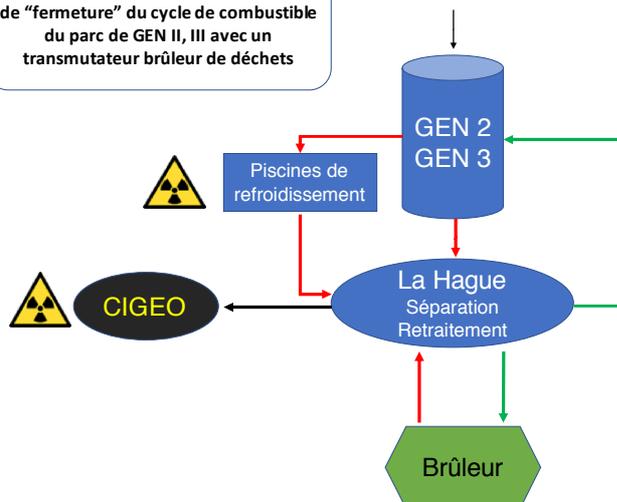
Illustration simplifiée du cycle de combustible "ouvert" du parc de GEN II, III



## Schéma 2

Dans la perspective de fermer le cycle actuel, une des possibilités serait de connecter le « brûleur » transmutateur de déchets au centre de retraitement de la Hague. Cela peut être un système hybride (transmutateur au thorium, fusor, laser, etc.).

Illustration simplifiée d'une possibilité de "fermeture" du cycle de combustible du parc de GEN II, III avec un transmutateur brûleur de déchets



**Président / Directeur de la publication :** Julien Elmaleh - **Directrice éditoriale :** Christine Kerdellant (01 77 92 94 83) - **Rédacteur en chef :** Philippe Rodrigues (01 79 06 71 78) - **Rédacteurs :** Christelle Deschaseaux (01 79 06 71 75) - Stéphanie Frank (01 79 06 71 73) - Louise Rozès Moscovenko (01 79 06 71 77) - Edwige Wamanisa (01 79 06 71 76) - **Assistante :** Stéphanie Leclerc (01 79 06 71 80) Courriel : [stephanie.leclerc@infopro-digital.com](mailto:stephanie.leclerc@infopro-digital.com)  
**Principal actionnaire :** INFO SERVICES HOLDING - **Société éditrice :** Groupe Moniteur SAS au capital de 333 900 euros. RCS : Paris B 403 080 823  
**Siège social :** 10 place du général de Gaulle, BP20156, 92186 Antony Cedex - **N° ISSN :** 0153-9442 - **Numéro de commission paritaire :** 0420 T 79611  
**Numéro de commission paritaire :** 0420 T 79611 - **Impression :** AB Printed - BAT A2, 21 rue Georges Méliès, 95 240 Corneilles en Paris - **Dépôt légal :** à parution