

# Le multirecyclage du plutonium en REP, une stratégie perdante !

Dominique Grenèche

La France, qui était considérée comme un des leaders mondiaux des technologies nucléaires, avait décidé il y a 50 ans que le nucléaire devait être durable et consommer l'intégralité du contenu énergétique potentiel de l'uranium en retraitant ses combustibles des réacteurs actuels à eau pressurisée (REP), et en développant les réacteurs à neutrons rapide de quatrième génération surgénérateurs (RNR) . Nous bénéficions en effet d'une situation exceptionnelle, avec une réserve d'uranium « appauvri », stratégique, qui représente potentiellement des milliers d'années de production d'électricité.

L'arrêt scandaleux de Superphénix en 1997, puis du projet Astrid en 2019 ont fragilisé notre pays, malgré le fonctionnement remarquable de Phénix jusqu'en 2010, qui a démontré les performances des RNR, tant pour la production d'énergie que pour la réduction des quantités de déchets ultimes.

Mais seulement trois ans après la décision d'arrêt d'Astrid, le paysage est renversé par la décision de relancer le nucléaire dans notre pays, l'émergence d'une Alliance du nucléaire regroupant 16 pays européens, et le foisonnement mondial de projets de nouveaux réacteurs innovants, souvent iso ou surgénérateurs. La raison en est limpide, le nucléaire est décarboné, pilotable, économiquement maîtrisé.

Nous analysons ci-dessous les conséquences de ce basculement sur la gestion du cycle du combustible dans notre pays. Faut-il poursuivre le programme en cours visant à réduire drastiquement notre stock de plutonium issu du retraitement des combustibles, avec le multirecyclage dans les REP, ou faut-il conserver précieusement ce plutonium pour disposer du stock nécessaire au déploiement des réacteurs surgénérateurs ? Et faut-il avec le multirecyclage se préparer à reclasser en déchets notre réserve d'uranium appauvri ou, grâce aux surgénérateurs, la transformer en ressource énergétique au bénéfice des générations futures, alors que la ressource d'uranium naturel va forcément s'amenuiser.

## **1. Comprendre la vie du combustible nucléaire : la charge initiale**

Au départ le combustible chargé dans un réacteur contient de l'uranium enrichi en uranium 235 fissile<sup>1</sup>, l'U235 dans une usine de séparation isotopique par ultracentrifugation, qui a porté sa teneur de 0,7 % (l'uranium naturel contient 99,3 % d'uranium 238 fertile ou U238) à 4 à 5 %. Il est consommé dans nos réacteurs nucléaires, les réacteurs à eau pressurisée, dits réacteurs à « neutrons lents », qui ont été conçus pour privilégier la fission de l'U235.

L'optimisation du cycle du combustible nucléaire dépend de nombreux paramètres et, pour rendre cette gestion compréhensible, nous nous limiterons dans cette étude à une comparaison avec un cas standard impliquant un enrichissement initial de l'uranium de 4,2 %, et une stratégie avec un seul recyclage, le monorecyclage , avec introduction d'un tiers d'éléments combustibles mixtes uranium plutonium (MOX) dans 22 de nos réacteurs, qui sont tous des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP).

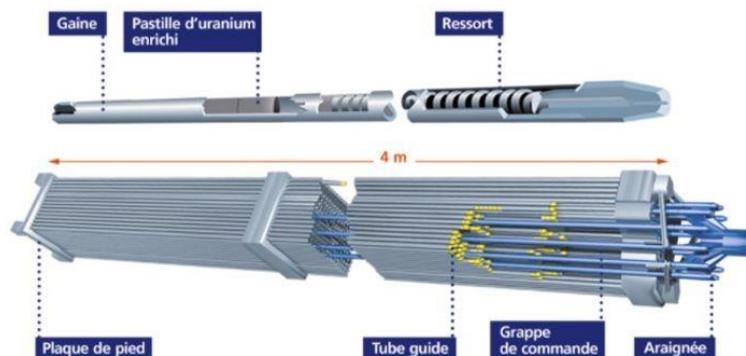
Comme tout système de production, l'industrie nucléaire produit des résidus, pour partie des matières recyclables et pour partie des déchets. Ils sont confinés à l'intérieur de « crayons » (tubes étanches en zirconium), dans des pastilles (initialement de l'oxyde d'uranium) au cœur des assemblages de combustibles dits « usés » (CU) qui sont déchargés du cœur, une fois qu'ils ont délivré toute l'énergie qu'il est possible d'en extraire avec la charge initiale d'U235. Or ces pastilles combustibles contiennent seulement 5% de déchets ultimes, essentiellement les produits de fission (96 % de la masse totale des déchets ultimes) et des noyaux atomiques lourds formés en réacteur, appelés « actinides mineurs ». Il

---

<sup>1</sup> Se souvenir d'une notion fondamentale : un matériau peut-être fissile et délivrer une énorme quantité d'énergie lors d'une réaction en chaîne contrôlée dans un réacteur : c'est le cas de l'U 235 ou du Pu 239. D'autres sont fertiles : en capturant des neutrons dans le réacteur un isotope fissile (ex. U 238) peut être transformé en un isotope fissile (PU 239) : c'est pourquoi il est nommé fertile.

faut y ajouter les déchets des structures métalliques de l'assemblage qui ont été contaminés ou activés pendant l'irradiation du combustible et les gaines.

## CRAYON ET ASSEMBLAGE COMBUSTIBLE



Source SFEN

Le reste, soit 95 % de la masse totale des matières résiduelles est constitué de deux éléments potentiellement valorisables:

1. L'uranium résiduel, qui n'a pas été consommé dans le réacteur, soit 94%. Il est appelé uranium de retraitement (URT) et contient encore une proportion significative d' $U_{235}$ , supérieure à celle de l'uranium naturel, environ 0,8 %. Il peut donc être réenrichi.
2. Le plutonium (Pu), un peu plus de 1 %, qui est un élément artificiel créé pendant l'irradiation du combustible par captures de neutrons par l' $U_{238}$  fertile. Ce plutonium comprend 5 isotopes, seuls deux d'entre eux, majoritaires, étant fissiles au même titre que l' $U_{235}$ , le  $Pu_{239}$  et le  $Pu_{241}$ <sup>2</sup>.

Typiquement, un assemblage usé du combustible (le CU) d'un REP alimenté en uranium enrichi contient quand il est déchargé du réacteur :

Isotopes - Proportion en %	234	235	236	238	239	240	241	242
Uranium	0,02	0,98	0,57	98,4				
Plutonium				2,3	53,2	23,3	14,9	6,3

*Les proportions d'isotopes de l'U et du Pu pour une gestion du cœur par 1/3,*

Au titre de la préservation des ressources naturelles, ces matières valorisables doivent être recyclées. La première étape, dans des installations dites de traitement des CU (usine de La Hague), consiste à cisailer directement l'ensemble de l'assemblage de combustible pour obtenir de petits tronçons de crayons de combustibles (d'environ 35 mm de longueur), puis de dissoudre leur contenu, et enfin à séparer chimiquement les trois résidus : l'U résiduel, dit Uranium de Retraitement (URT), le Pu qui est un combustible nucléaire (matière fissile), et enfin les déchets ultimes qui sont ultérieurement vitrifiés et entreposés pour décroissance radioactive avant d'être envoyé vers un centre de stockage géologique (La procédure de « Demande d'autorisation de construction » de CIGEO vient d'être engagée par l'Autorité de sûreté nucléaire).

<sup>2</sup> Deux isotopes ont les mêmes caractéristique chimiques mais différent par leur masse (nombre de neutrons différents)

Aujourd'hui en France, l'URT n'est que très marginalement recyclé dans les réacteurs après réenrichissement en U235 (URE), à une teneur un peu supérieure à celle du combustible initial afin de compenser la pénalité de l'U236, qui capture les neutrons sans conduire à des fissions.

## **2. Le monorecyclage du Pu en REP**

Le plutonium est recyclé en France aujourd'hui une seule fois en le mélangeant à de l'uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement, dont le contenu résiduel en U235 est typiquement de l'ordre de 0,25 %. Il est intégré dans un combustible appelé MOX (pour Mixed OXyde), qui contient au départ environ 92 % d'uranium appauvri et 8 % de plutonium. C'est le monorecyclage.

Plusieurs pays, dont les USA, la Suède et la Finlande ne retraitent pas les CU, considérés alors comme des « déchets ultimes » qui seront stockés définitivement en couche géologique profonde. Cette option est dite de « cycle ouvert ». D'autres pays, comme la France et le Japon<sup>3</sup>, ont choisi le monorecyclage du CU pour leurs réacteurs à eau légère. La Russie retraite également son CU mais recycle le Pu dans des combustibles MOX chargés dans leurs RNR.

Les atouts du retraitement des combustibles usés associé au monorecyclage sont notables :

- la réduction de volume des combustibles usés d'environ un facteur 7 par rapport au stockage direct de ces combustibles usés ;
- la réduction de la consommation d'uranium naturel d'environ 10 % dans le cas du recyclage de la totalité du plutonium récupéré (situation actuelle en France lorsque l'usine MEMOX est pleinement opérationnelle).

Il présente cependant des limites:

- Le REP n'étant pas optimisé pour fonctionner avec du combustible MOX, le cœur n'est « moxé » qu'à environ 30%.
- Le Pu est partiellement utilisé et l'uranium appauvri n'est que marginalement consommé. Ces matières énergétiques restent donc entreposées dans l'attente d'une valorisation future.

L'essentiel de l'U238 fertile reste ainsi inutilisé alors que son potentiel énergétique (après sa transformation en Pu) est le même que celui de l'U235 fissile. La valorisation du Pu dans le MOX reste modeste, environ 25 % par recyclage, et les stocks de Pu continuent à croître.

## **3. Multirecyclage du Pu en REP ou surgénération dans un parc nucléaire de 4ème génération ?**

Une étude très argumentée pour aller au-delà du monorecyclage actuel a été réalisée dans le cadre de l'élaboration du Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs<sup>4</sup>, avec un objectif d'optimisation des ressources naturelles. Quatre options ont été comparées :

1. un parc REP sans recyclage ou « cycle ouvert » servant de référence
2. un parc REP avec monorecyclage du Pu
3. un parc REP avec multirecyclage du Pu
4. un parc RNR avec multirecyclage de l'uranium et du Pu ou « cycle fermé »

Le tableau ci-dessous montre clairement les performances inégalables des surgénérateurs (colonne 4), qu'il s'agisse de la consommation ou de la production de déchets ultimes.

---

<sup>3</sup> L'Allemagne, la Belgique, l'Italie, les Pays-Bas, la Suède, la Suisse, l'Espagne, l'Australie et le Japon ont signé des contrats pour le traitement-recyclage de leurs combustibles usés en France ou au Royaume-Uni. Certains d'entre eux (Suisse, Allemagne, Belgique), ont utilisé du combustible MOX (fabriqué en France) dans leurs réacteurs

<sup>4</sup>Le Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs est élaboré sous l'égide de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en application de la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion des matières et des déchets radioactifs. <https://www.asn.fr/espace-professionnels/installations-nucleaires/le-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs>.

scénario	1	2	3	4
	REP sans recyclage	REP avec monorecyclage	Multirecyclage en REP	Multirecyclage en RNR
uranium enrichi	19 t	17 t	18 t	0 t
% uranium 235 fissionné	58	58	49	100
% matière fissile non utilisée	62	57	59	0,1
Transuraniens produits	30 kg	21 kg	9 kg	4 kg
- dont Pu	27 kg	16 kg	0 kg	0kg
- dont actinides mineurs	3 kg	5 kg	9 kg	4kg
			le plutonium est transmuté en déchet	le plutonium a produit de l'électricité

<https://nucleairedurable.fr/le-multirecyclage-en-rep.html>

Par rapport à l'option 1, sans recyclage, le monorecyclage du Pu en REP (option 2) permet de réduire de 10% (et jusqu' 12 %) le besoin en uranium et de réduire de 40 % la quantité de Pu produite lors du cycle ouvert. Mais il augmente de 66 % la quantité d'actinides mineurs mise aux déchets.

3.1. **Le multirecyclage du Pu en REP** (option 3) est moins performant que le monorecyclage car il faut enrichir davantage l'uranium pour compenser la dégradation isotopique du Pu après chaque recyclage, avec croissance de la part non fissile de ce Pu (isotopes 238, 240 et 242) : on dit que le plutonium se dégrade. De plus, il augmente de 300 % la quantité d'actinides mineurs à mettre aux déchets par rapport au cycle ouvert (aucun recyclage du Pu). Ainsi, le multirecyclage du Pu en REP transforme une large partie de la matière énergétique en déchets ultimes tout en continuant à consommer la ressource primaire, l'U<sub>235</sub>. Le gain de consommation d'uranium naturel, qui est d'environ 10 % avec le monorecyclage, n'est que de 15 % avec le multirecyclage, toutes choses égales par ailleurs. Les études actuelles estiment à environ 20% le gain potentiel dans le cas d'un multirecyclage portant à 50% la part de MOX chargé dans le réacteur (au lieu de 30% actuellement pour le monorecyclage).

Deux obstacles cependant :

- la technologie du multirecyclage n'est pas encore qualifiée et nécessiterait des études longues et coûteuses alors que les moyens d'essais du CEA, les réacteurs d'irradiation en particulier, sont tous arrêtés.
- Les installations industrielles actuelles, et particulièrement l'usine MELOX de fabrication des combustibles MOX, n'ont pas été conçues pour un plutonium ayant composition isotopique aussi dégradée (vers 50 % de Pu non fissile) et des teneurs en matière fissile qui doivent être plus élevées pour compenser cette dégradation. Un tel scénario impliquerait évidemment de mettre en œuvre de nouvelles capacités de retraitement et de fabrication de combustibles MOX, ce qui nécessiterait de lourds investissements que rien ne justifie.

### 3.2. La préparation du déploiement des réacteurs surgénérateurs

L'objectif doit, en cohérence avec une politique de développement durable et de préservation des ressources, viser à constituer un stock de plutonium de bonne qualité, issu du premier retraitement ou de celui du monorecyclage, pour préparer un déploiement ambitieux des réacteurs dits « à neutrons rapides » (RNR), de 4ème génération, qui présentent l'énorme avantage de transformer efficacement l'uranium 238 en PU 239 fissile de bonne qualité par capture neutronique.

L'extraordinaire stock d'uranium appauvri que nous détenons devient un combustible et nous protège d'un épuisement progressif de la ressource en uranium naturel.

#### **4 - Éléments de réflexion pour une politique nucléaire**

L'arrêt du projet de réacteur rapide de démonstration Astrid, en 2019, était en contravention avec la loi de 2006, qui prévoyait explicitement la mise en service d'un tel réacteur 2020, ce que l'OPECST a explicitement condamné, le parlement n'ayant pas été consulté. Cette décision, qui visait à reporter sine-die le développement industriel des RNR, a remis en selle le projet de multirecyclage du plutonium en REP, malgré ses inconvénients. L'objectif des décideurs semble être de limiter l'inventaire global de plutonium, abandonnant ainsi l'objectif de préservation des ressources. Cette orientation conduit à transformer en déchets une réserve énergétique considérable, l'uranium appauvri, déjà présent sur le sol national, ce qui a déjà été proposé par la DGEC (ministère de la transition énergétique). C'est une solution qui, techniquement parlant, revient à mettre de « l'or à la poubelle » et se révèlera coûteuse car le combustible, plus irradiant, nécessitera des investissements pour le retraitement et la fabrication, dont le réalisme technologique et économiques n'est pas encore démontré.

C'est une vision étriquée du développement de l'énergie nucléaire sur le long terme, qui doit impérativement s'affranchir de la dépendance aux approvisionnement en uranium naturel. Seuls les réacteurs régénérateurs (ou mieux encore surgénérateurs) offrent la capacité à consommer la quasi-totalité de l'inventaire de l'uranium, le 238 comme le 235. C'est une réalité scientifique et technique incontestable validée par l'expérience internationale significative acquise sur les prototypes de ces réacteurs nucléaires, en particulier en France. A cet égard il convient de rappeler deux éléments fondamentaux qui doivent servir de base à l'élaboration d'une stratégie responsable dans ce domaine:

- Selon les estimations communes de l'AIEA et de l'OCDE, les ressources assurées ou présumées en Unat exploitables à des coûts raisonnables sont de l'ordre de 12 millions de tonne (15 millions de tonnes en acceptant de payer 4 à 5 fois le prix moyen à long terme de l'uranium tel qu'il est pratiqué aujourd'hui sur les marchés).
- Compte tenu de ces chiffres et de la consommation actuelle dans le monde (autour de 60 000 tonnes par an), une raréfaction des ressources en uranium se profile à la fin de ce siècle, même en supposant une croissance limitée du parc mondial de réacteurs nucléaires.

Il faut donc constituer le stock de plutonium de bonne qualité permettant le déploiement de la quatrième génération. Une telle décision serait d'autant plus fondée que nous sommes le seul pays au monde qui rassemble tous les atouts pour déployer ces RNR à grande échelle. En, effet :

- Nous possédons une expérience unique au monde sur cette technologie, grâce à notre vaste programme passé de R&D couronné par la construction et l'exploitation des RNR de puissance Phénix et Superphénix et l'étude d'Astrid.
- La France bénéficie d'un savoir-faire industriel exceptionnel sur le traitement de combustibles usés, le recyclage du plutonium et la fabrication de combustibles MOX.
- Nous avons accumulé sur notre territoire national un stock précieux et considérable d'uranium appauvri (330 000 tonnes à ce jour). Stable chimiquement, non inflammable, faiblement radioactif et de très faible volume, son entreposage ne pose aucun problème critique et ne présente aucun risque pour l'environnement.

L'examen des dizaines de projets en développement dans le monde sur les réacteurs innovants, avec de grands pays industriels comme les USA, la Chine, et maintenant des pays européens montre qu'il est urgent de décider d'une vision à long terme dans un domaine qui reste d'excellence en France.