

# Plutonium et combustible MOX

Rédaction Global chance

## Le plutonium

Le plutonium est un élément chimique de numéro atomique 94 et de symbole « Pu » qui n'existe dans la nature qu'en quantités infimes et qui est produit en quantités importantes dans le cœur des réacteurs nucléaires, à partir de l'uranium (numéro atomique 92 et symbole U).

Le plutonium produit dans les réacteurs est constitué d'un ensemble d'isotopes. Les uns, les plutoniums 239, 240, 241, 242, 243 sont produits à partir de la capture d'un neutron par un noyau d' $U^{238}$  et l'isotope  $Pu^{238}$  est produit à partir de l' $U^{235}$ .

Comme l' $U^{235}$ , le  $Pu^{239}$  est fissile (le  $Pu^{241}$  également) et contribue à la réaction en chaîne dans le réacteur au fur et à mesure de sa création.

Du fait du rôle principal du  $Pu^{239}$  fissile, on oublie généralement les autres isotopes. Dans le cas d'un réacteur à eau et uranium enrichi, le  $Pu^{239}$  représente en poids 59 % du plutonium contenu dans le combustible usé et le  $Pu^{241}$ , 11 %, ce qui porte à 70 % la proportion d'isotopes fissiles, soit plus des deux tiers du Pu total.

Si le  $Pu^{239}$  est sur le plan « pondéral » l'isotope majeur du plutonium produit dans le réacteur, il n'en va pas de même en termes de charge radioactive.

Tous les isotopes et composés du plutonium sont toxiques et radioactifs. La radioactivité d'une quantité de plutonium dépend de sa composition en différents isotopes, chacun ayant une « durée de vie » différente et un type différent d'émission de particules<sup>1</sup>.

Ainsi, le  $Pu^{239}$  a une « demi-vie » (temps au bout duquel la moitié de la quantité initiale de cet isotope s'est transformée) de 24110 ans, tandis que celle de  $Pu^{241}$  est de 14,4 ans et celle de  $Pu^{238}$  de 87,7 ans.

Dans le plutonium couramment produit dans les réacteurs des centrales nucléaires, la radioactivité provient surtout de  $Pu^{241}$  (émetteur « bêta », électrons) et de  $Pu^{238}$  (émetteur « alpha », noyau d'hélium). De plus, le  $Pu^{241}$  se transforme en américium 241, émetteur « alpha » de 433 ans de demi-vie. L'activité massique très élevée du plutonium 238 produit, par absorption des « alpha » dans le combustible, un fort dégagement de chaleur.

Si des particules de plutonium sont inhalées ou ingérées, elles irradient directement les organes où elles se sont déposées : le poumon dans le cas d'une inhalation et dans le cas d'une ingestion le foie et les surfaces osseuses notamment. La période biologique du plutonium est très longue car l'élimination de 50 % de la charge de l'organisme nécessiterait 50 ans dans le squelette et 20 ans environ dans le foie. Il peut donc affecter l'ADN et provoquer des cancers.

Les installations industrielles traitant du plutonium (usines de retraitement, usines de fabrication de combustibles au plutonium, transports de plutonium) nécessitent des barrières de protection épaisses (béton, hublots épais...) pour se protéger des émissions de rayonnements « gamma » et « neutrons » (neutrons qui proviennent des réactions nucléaires dans l'oxyde de plutonium qui est la matière ouvragée) et du risque de criticité. Une dépression doit également être assurée afin d'éviter toute sortie accidentelle d'aérosols des zones actives.

En termes de radioprotection, la limite de dose annuelle induite par une activité nucléaire, fixée par les autorités de radioprotection pour le public (1 millisievert/an) peut se traduire en limite d'incorporation du plutonium par voie respiratoire ou digestive. Ce calcul donne, pour un adulte du public exposé à l'inhalation de  $Pu^{239}$ , environ 1/100<sup>e</sup> de millièmième de gramme (1/100<sup>e</sup> de microgramme).

*1 - Les isotopes du plutonium sont des émetteurs alpha à 100 % à l'exception du plutonium 241 qui est un émetteur bêta pratiquement « pur » (émission additionnelle alpha de 2,3 millièmième de %).*

## Production et utilisation du plutonium

À la fin de leur utilisation dans le réacteur nucléaire d'une centrale électrique (après trois ou quatre ans environ), les combustibles irradiés sont stockés sous eau dans des « piscines » situées à proximité des réacteurs. Ils sont constamment refroidis par circulation d'eau afin d'évacuer la chaleur produite par la radioactivité des produits de fission et des transuraniens (dont le principal est le plutonium) qu'ils contiennent.

La solution adoptée dans la majorité des pays équipés de centrales nucléaires (États-Unis, Allemagne, Suède, Corée du Sud...) est de garder les combustibles irradiés en l'état, de les laisser dans les piscines de stockage, et, après quelques années éventuellement, dans des installations de stockage à sec, lorsque leur radioactivité et la chaleur qu'ils dégagent auront suffisamment diminué.

En France (La Hague) et au Royaume-Uni (Sellafield) par contre, le plutonium est extrait des combustibles irradiés dans une usine dite de « retraitement », aujourd'hui essentiellement à partir des combustibles de leurs propres centrales, mais aussi, dans le passé, pour des combustibles « étrangers » (Allemagne, Belgique, Italie, Japon<sup>2</sup>, Pays Bas, Suède, Suisse...).

La technique du retraitement consiste à séparer par voie chimique les trois grands composants du combustible irradié : uranium, plutonium, produits de fission et transuraniens (autres que le plutonium). Cette technique a été historiquement développée durant la seconde guerre mondiale pour la production de plutonium à des fins militaires (la « bombe atomique », également développée avec de l'uranium 235 obtenu par « enrichissement » de l'uranium naturel). Puis la production de plutonium a été poursuivie et amplifiée pour fournir du combustible à la filière des « surgénérateurs » : Phénix et Superphénix en France.

## Le MOX

En parallèle à cette utilisation, un nouveau combustible a été imaginé pour se substituer au combustible classique à uranium enrichi en U<sup>235</sup> (3,5 % contre 0,71 % dans l'uranium naturel) dans les réacteurs à eau ordinaire et uranium enrichi (PWR et BWR). Ce nouveau combustible, appelé MOX<sup>3</sup> (oxyde mixte d'uranium et de plutonium : UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>), contient de l'uranium appauvri en U<sup>235</sup> et en moyenne 7 % de plutonium (5 à 12,5 % suivant la position dans le cœur)<sup>4</sup>. Superphénix ayant été définitivement arrêté et la filière abandonnée, le MOX s'est trouvé être le « débouché » pour une partie importante du plutonium produit par le retraitement (il reste cependant des quantités importantes de plutonium entreposées à l'usine de retraitement de La Hague, de l'ordre de 56 tonnes fin 2012, dont 37,8 t appartiennent à la France). Fin 2012, la France disposait d'un total de 52,5 tonnes de plutonium (La Hague, usine Mélox de fabrication du combustible MOX à Marcoule, combustible MOX neuf entreposé dans les réacteurs EDF, ainsi que sur le site de l'usine de fabrication de MOX à Marcoule).

Les combustibles MOX neufs et usés sont beaucoup plus chauds que les combustibles UO<sub>2</sub> classiques. L'entreposage en piscine des combustibles MOX usés nécessite une compensation pour l'évaporation plus importante que celle des piscines qui contiennent des combustibles UO<sub>2</sub>. Enfin, le temps de séjour en piscine ou en stockage à sec des combustibles MOX usés est beaucoup plus long que celui des combustibles UO<sub>2</sub> et ces combustibles ne sont pas retraités<sup>5</sup> (il reste en fin de vie du combustible environ 6,7 % de plutonium pour un MOX à 8,65 %). On estime généralement qu'il faut entreposer 60 ans un combustible irradié à base d'uranium avant stockage définitif mais 150 ans un combustible MOX irradié. Durant l'entreposage sous eau, les piscines doivent être en permanence refroidies par des échangeurs.

Du combustible MOX est utilisé dans 22 réacteurs en France. Le rechargement annuel des réacteurs avec du combustible MOX est d'environ 7,4 tonnes par réacteur et par an. De 2006 à fin 2010, 740 tonnes de MOX ont été déchargées.

Fin 2011, l'entreposage dans les piscines de La Hague de combustibles irradiés issus des réacteurs à eau était de 9 709 tonnes, dont 1 140 tonnes de MOX. Fin 2012, la quantité de combustibles usés a atteint 9 790 tonnes. La capacité de ces piscines a été portée de 12 000 à 18 000 tonnes, après renforcement de la protection neutronique des « paniers » contenant les combustibles.

Du combustible MOX avait été chargé récemment dans des réacteurs japonais, dont le réacteur 3 de la centrale de Fukushima au Japon (32 assemblages MOX sur 548), aujourd'hui très gravement accidenté. L'exploitant TEPCO estime qu'environ 70 % du combustible du réacteur n° 3 a fondu.

2 - Après le démarrage d'une usine de retraitement pilote d'une capacité de 100 t/an (Tokai Mura) en 1977, le Japon devait également démarrer à Rokkasho une usine de retraitement construite depuis avril 1993 par Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) avec l'appui industriel d'AREVA. Ce complexe industriel produirait du combustible MOX à partir du plutonium fourni par l'usine de retraitement (800 t/an). Cette construction a connu de nombreux retards et son coût a été multiplié par plus de trois (de 8 à 29 milliards de dollars). Les premiers tests de retraitement ont démarré en avril 2006 mais de nombreux problèmes techniques sont apparus. Les reports de démarrage se sont multipliés et il était question récemment de mi-2015.

3 - Les surgénérateurs fonctionnent aussi avec un MOX dont le contenu en Pu est beaucoup plus élevé (>20 %).

4 - La teneur moyenne en plutonium est égale à 7,08 %, pour un cœur chargé à 30 % par du MOX, avec un renouvellement par tiers de cœur. Cette teneur moyenne passe à 8,65 % par un renouvellement par quart de cœur. Elle devrait passer à 9,5 %. La teneur maximale d'un assemblage est de 12 %.

5 - Entre 1998 et 2009 les usines de La Hague ont retraité 68,5 tonnes de MOX alors que dans le même temps, 12 445 tonnes de combustibles UO<sub>2</sub> ont été retraitées. Le retraitement des MOX ne concerne que 0,55 % de l'ensemble des combustibles retraités et n'a été effectué qu'à titre de démonstration de la faisabilité technique.