

LE PLUTONIUM

RÉSUMÉ

Le plutonium est un élément chimique artificiel dont le numéro atomique est 94. Initialement, il a été produit lors de la création de l'univers, mais il a quasiment totalement disparu depuis, sauf à l'état de traces dans certains minerais d'uranium et de terres rares. Actuellement il est issu de l'irradiation de l'uranium dans les réacteurs nucléaires.

C'est un métal radioactif transuranien de la famille des actinides. Il se présente sous la forme d'un solide cristallisé de couleur gris argenté.

Historique

Il a été découvert en février 1941 par le physicien américain Glenn Seaborg, à l'époque de la seconde guerre mondiale. Venant à la suite de l'uranium et du neptunium dans le tableau périodique, ce nouvel élément chimique a été nommé en référence à la planète Pluton.

Production

C'est l'un des composants du cycle du combustible nucléaire. Il est produit par l'irradiation de l'uranium par des neutrons. Le combustible nucléaire usagé issu des réacteurs à eau légère conventionnels produit un mélange d'isotopes ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu et ^{242}Pu . L'isotope le plus intéressant par son caractère fissile est le ^{239}Pu (période radioactive 24 000 ans), et dans un moindre mesure le ^{241}Pu ¹ lui aussi fissile. Le parc nucléaire français produit chaque année environ 11 tonnes de plutonium.

Toxicité

Le plutonium, s'il est inhalé ou ingéré, irradie directement les cellules des organes qui sont au contact avec lui (ou qu'il a pénétrés). Sa radioactivité est issue de sa forte activité massique, et de la forte énergie de ses émissions alpha (de l'ordre de 5 MeV). La radiotoxicité du plutonium, à l'inverse de celle de l'uranium jusqu'à un taux d'enrichissement de l'ordre de 10 %, est prépondérante par rapport à sa toxicité chimique. Le plutonium présente un risque d'incendie, particulièrement lorsqu'il est sous forme de poudre finement divisée.

Utilisation

Pour le nucléaire civil, le plutonium peut être ajouté à l'uranium pour fabriquer du combustible nucléaire et compléter ainsi une ressource aussi rare que l'uranium 235, seul radioélément fissile naturel. La France a fait le choix d'extraire cet élément des combustibles REP usés et, au lieu de le stocker en tant que « déchet », et de l'incorporer dans un combustible, le MOX (Oxyde mixte d'uranium et plutonium) pour être recyclé dans les réacteurs existants. Le combustible MOX est plus radioactif que les combustibles naturels à Uranium enrichi (UNE).

Après les 3 ou 4 années passées en réacteur, ce combustible contient encore du plutonium, mais la proportion de Pu fissile a diminué. Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) ont besoin de ce plutonium de seconde génération pour régénérer leur combustible, contribuant ainsi à la destruction du plutonium issu du retraitement des combustibles REP. Non utilisé, ce dernier deviendrait un déchet qui nécessite un stockage de longue durée.

On évalue à 1000 tonnes la quantité annuelle de plutonium. Selon certains experts, « les réserves (aisément exploitables) d'uranium fissile ne dépasseraient pas 70 ans ». Il pourrait alors être utile de disposer de cette ressource largement plus importante grâce aux possibilités offertes par la surgénération.

Pour les activités de défense, le ^{239}Pu sert à fabriquer les bombes nucléaires. Plus aisément fissile que l' ^{235}U , le plutonium est recherché par les militaires pour confectionner des armes nucléaires.

Pour limiter les risques de prolifération associés, le plutonium fait l'objet de nombreux textes et conventions internationaux visant à en prévenir le risque. Le plutonium recyclé à partir de combustible nucléaire usé présente un risque de prolifération limité en raison de sa contamination élevée en isotopes non fissiles tels que le plutonium 240 et le plutonium 242, dont l'élimination n'est pas réalisable par des technologies actuellement maîtrisées.

¹ Le plutonium 241 bien plus radioactif que le plutonium 239, produit, par désintégration β , de l'américium 241, un « actinide mineur » fortement émetteur de particules α indésirables dans les applications habituelles du plutonium.

1. PRÉAMBULE

La production d'énergie par réactions nucléaires requiert des atomes fissiles. Dans la nature, le seul élément fissile présent quantitativement est l'uranium-235 qui, associé à l'uranium-238 largement prépondérant produit, par capture d'un neutron, de l'uranium-239 qui décroît rapidement en plutonium 239².

Cet élément a existé depuis le début de l'univers et continue d'exister naturellement sur notre planète. Présent partout dans la croûte terrestre, il est formé par le rayonnement neutronique ambiant, initié par le rayonnement cosmique venant du soleil, agissant sur les atomes d'uranium.

Du plutonium 239 a été généré également lors du fonctionnement des réacteurs naturels d'Oklo, il y a deux milliards d'années (voir [fiche argumentaire GAENA "Les réacteurs nucléaires naturels d'Oklo"](#)). Sa présence dans la pechblende venant du Canada a été mise en évidence dès 1942, par SEABORG et PERLMAN, un an après sa synthèse ou "découverte". Néanmoins l'histoire du plutonium a vraiment débuté avec l'utilisation par l'homme de l'énergie nucléaire.

Dès 1934, Irène et Pierre JOLIOT-CURIE ont démontré la possibilité de générer des radioéléments en irradiant par un flux de particules des éléments stables ou radioactifs. Une recherche intense se développe alors dans le monde et de nombreuses expérimentations sont effectuées.

La première génération de l'élément plutonium est obtenue en décembre 1940. À l'Université de Californie (Berkeley), SEABORG et ses collaborateurs SEGRE et WAHL obtiennent l'isotope 238 en bombardant une cible constituée d'uranium 235 par des noyaux d'hydrogène lourd (deutérium) accélérés dans un cyclotron. Cette même équipe, dès l'année suivante, découvre le plutonium 239 en soumettant une cible d'uranium 238 à un flux de neutrons et démontre le caractère fissile de cet isotope. Avec le démarrage du projet Manhattan visant à doter les Etats-Unis de l'arme nucléaire, le premier microprogramme de plutonium, sous forme d'oxyde solide, est isolé le 20 août 1942 par CUNNINGHAM et WERNER.

En France, l'histoire du plutonium commence avec le démarrage de la pile ZOÉ en décembre 1948. Onze mois plus tard, presque jour pour jour, GOLDSCHMIDT et ses collaborateurs, Pierre REGNAUT, Jean SAUTERON et André CHESNE réalisent la séparation du premier milligramme de plutonium dans un élément combustible de la pile dans le laboratoire du centre du Bouchet. Ce premier "retraitement" est suivi d'une mise au point industrielle d'un procédé de production de plutonium, également à des fins militaires, dans l'usine pilote de Châtillon. L'année 1958 voit le démarrage de l'usine du centre de production de Marcoule. Le premier lingot de plutonium est élaboré le 20 février 1959 à partir de combustibles irradiés dans la pile G1. Enfin, une année plus tard, la première explosion d'un engin nucléaire (« gerboise bleue ») est réalisée à REGGANE.

Après ces démonstrations explosives du caractère énergétique du plutonium, vient, comme pour l'uranium, l'ère de son utilisation pacifique.

2. CARACTÉRISTIQUES DU PLUTONIUM

Élément chimique de numéro atomique 94, le plutonium doit son nom, par analogie avec les éléments qui l'ont précédé dans la classification périodique, l'uranium et le neptunium, à la planète Pluton découverte après Uranus et Neptune, et non au dieu des morts de la mythologie.

La période radioactive du Pu 239 est de 24 110 ans.

Le plutonium est un métal de la famille des actinides présentant, comme la plupart des autres métaux, un aspect argenté brillant comme le nickel. Cependant, au contact de l'air, il se recouvre rapidement d'une couche terne grisâtre, avec des couleurs pouvant tirer sur le jaune ou le vert olive, cette dernière teinte provenant du dioxyde de plutonium PuO₂.

C'est un métal de densité très élevée (19,8). Ses propriétés physico-chimiques sont complexes et ont fait l'objet d'un nombre d'études considérable dans le monde. Il existe des isotopes du plutonium ayant des nombres de masse atomique compris entre 236 et 244. Le métal peut exister sous six formes cristallines entre la température ambiante et son point de fusion (640 °C). L'élément plutonium peut présenter en solution cinq états d'oxydation. Une plus grande diversité d'états lui a donné la réputation d'élément difficile chez les scientifiques et les ingénieurs qui ont eu à assurer son élaboration et son utilisation.

Cette grande diversité d'états lui a donné la réputation d'élément difficile chez les scientifiques et les ingénieurs qui ont eu à assurer son élaboration et son utilisation.

² À noter que dans le cadre de Génération-IV (voir [fiche argumentaire GAENA "Génération IV"](#)), la filière à base de thorium est aussi étudiée, mais il faudra utiliser dans un premier temps un isotope fissile (U-235, Pu-239) pour générer de l'U-232 fissile à partir de Th-232, isotope naturel fertile, et consommer le thorium naturel.

Actuellement, pour son emploi civil dans la production d'énergie, la physique et la chimie de cet élément sont bien connues et totalement maîtrisées après l'acquis de plus d'un demi-siècle d'expérience scientifique et technologique. Cependant, des études sont poursuivies sur l'ensemble des actinides dont le plutonium fait partie.

3. TOXICITÉ DU PLUTONIUM

Le plutonium apparaît dans l'opinion publique comme le poison radioactif le plus redouté.

Cette réputation n'est pas fondée sur l'observation de ses effets toxiques sur l'homme, car les faits cliniques sont très rares.

Dans les deux premières décennies de sa production et de sa mise en œuvre, il a été identifié, aux Etats-Unis, environ un millier de travailleurs qui étaient porteurs d'une contamination interne avoisinant ou dépassant la limite tolérée à l'époque. Après plus de trente années de suivi médical, aucune de ces personnes exposées n'a développé de cancer. En Russie par contre, des observations sur des employés du complexe nucléaire Mayak permettent de distinguer d'indiscutables effets pathologiques liés à une exposition au plutonium.

Le plutonium, depuis plus d'un demi-siècle, a été l'objet de l'attention des radio-pathologistes dans le monde entier. Cette sollicitude est justifiée :

- par ses caractéristiques d'élément peu soluble, retenu longtemps dans le poumon après inhalation et dans la plupart des tissus après transfert dans le sang. Il est à noter que son ingestion est mille fois moins dangereuse que son inhalation
- par ses caractéristiques radioactives d'émetteur alpha de longue période physique

Le plutonium partage cette forte toxicité radioactive avec le radium et le polonium, éléments naturels qui sont entre cinq fois et mille fois plus dangereux à masse égale.

La grande prudence, qui a résulté tout à la fois de la connaissance initiale du risque et de la quasi permanence des études, en fait un exemple de maîtrise quasi parfaite de mise en œuvre d'éléments dangereux que génèrent les activités humaines (voir [fiche argumentaire GAENA "Principe de précaution"](#)). En particulier, les connaissances disponibles sur ses modes de transfert et son métabolisme, ainsi qu'une technologie de protection très avancée, ont pour conséquence un nombre très faible d'incidents significatifs dans le monde, a contrario de ceux dus à la mise en œuvre du radium.

Les effets de l'exposition au plutonium par ingestion, inhalation et injection par blessure sont bien appréhendés et ne révèlent pas les caractéristiques d'un super toxique comme il est habituellement retenu pour les toxines biologiques, immédiatement mortelles à des concentrations des millions de fois plus faibles que celles qui pourraient, pour le plutonium, provoquer l'apparition tardive d'un cancer (15 à 45 ans de latence).

La disponibilité de toutes ces connaissances n'a pas interrompu la poursuite des recherches (voir publications du CEA sur www.cea.fr).

4. PRODUCTION DU PLUTONIUM

Les réactions de fission de l'uranium 235 qui se produisent dans le combustible des réacteurs nucléaires s'accompagnent d'émission de neutrons dont une partie est capturée par l'uranium 238 contenu également dans ce combustible. Cette capture transforme cet isotope principalement uranium-239 qui décroît rapidement en plutonium 239, puis des isotopes plus lourds (240, 241,...) se forment par capture successives.

Dans les réacteurs électrogènes, le plutonium produit est plus chargé en isotopes lourds à mesure que les taux de combustion et les durées de séjour du combustible augmentent. L'isotope 239 demeure cependant le plus abondant.

Le plutonium qui se forme dans les combustibles à uranium est partiellement consommé par fission lors de son séjour dans le réacteur et de ce fait compense partiellement la disparition des atomes d'uranium 235. Cette fission du plutonium dans les REP contribue pour un tiers à la production d'énergie libérée par le combustible.

Pour être plus précis, une tonne de combustible neuf contient environ 30 kilogrammes d'uranium 235 et 970 kilogrammes d'uranium 238. Lors de son séjour en réacteur dans les conditions d'exploitation actuelles, 20 kilogrammes de plutonium sont formés dont 10 kilogrammes détruits par fission donnant 10 kilogrammes de produits de fission, 20 kilogrammes d'uranium 235 subissent la fission en générant 20 kilogrammes de produits de fission.

Au terme de ce premier cycle de production d'énergie, il demeure donc dans une tonne de combustible usé 10 kilogrammes d'uranium 235, 950 kilogrammes d'uranium 238 et 10 kilogrammes de plutonium. Le potentiel

énergétique de ce plutonium est élevé. En effet, sa fission peut libérer une énergie de 220 millions de kWh et donc générer 70 millions de kWh d'électricité, soit deux jours de production d'un EPR.

Le fonctionnement des réacteurs du parc électronucléaire français génère environ 10 tonnes de plutonium chaque année. Contenu dans les combustibles usés stockés dans les piscines des centrales nucléaires ou de l'usine de la Hague en attente de retraitement, le plutonium est la propriété d'EDF qui en assure la gestion.

Le stock existant en France est de l'ordre de 150 tonnes essentiellement contenu dans les combustibles en cours d'utilisation ou usés stockés en piscine. Le stock mondial se situe autour de 1200 tonnes.

Cet important potentiel énergétique n'a évidemment que la valeur que peut lui donner la maîtrise de sa libération.

5. UTILISATION ACTUELLE DU PLUTONIUM

Très tôt, les responsables français de l'énergie atomique prévoient d'utiliser pour la production nucléaire d'électricité le potentiel d'énergie que représente le plutonium formé dans le combustible des réacteurs électrogènes utilisés (filrière graphite-gaz puis filrière à eau sous pression). La fission du plutonium peut être obtenue par des neutrons, qu'ils soient lents (réacteurs électrogènes actuels et EPR) ou qu'ils soient rapides (RNR).

L'intérêt de la mise en œuvre de neutrons rapides (tels qu'ils sont émis dans la fission) repose sur le fait que, dans cette option, les rendements de fission des différents isotopes du plutonium sont assez voisins. La fission par des neutrons ralentis (neutrons thermiques) privilégie les isotopes de masse impaire (^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{243}Pu) et la formation d'isotopes plus lourds de cet élément.

En toute logique scientifique industrielle les nombreuses études et recherches en neutronique aboutissent en 1967 au démarrage sur le centre de Cadarache d'un réacteur pilote de faisabilité refroidi au sodium liquide, dénommé Rapsodie (rapide – sodium), sans vocation électrogène et de puissance thermique 40 MW. Parallèlement, un atelier-pilote, AT1, est construit sur le centre de la Hague pour démontrer la faisabilité du retraitement industriel du combustible usé des réacteurs rapides jusqu'à des taux de combustion très élevés.

Fin 1973, un réacteur pilote industriel à vocation électrogène et surgénératrice, de puissance électrique 250 MW, Phénix, diverge à son tour sur le centre de Marcoule. Enfin, après plus de vingt ans d'expérience préindustrielle, une tête de série industrielle, Superphénix, débute son fonctionnement sur le site de Creys-Malville.

Cette filière de réacteurs à neutrons rapides (RNR) présente l'avantage de permettre l'utilisation de l'uranium 238 non fissile par sa transformation en plutonium, destiné à être à son tour consommé en réacteur (d'où le nom de surgénérateur donné à ce type de réacteur). Cette possibilité est modulable et permet de maîtriser le bilan du plutonium. Enfin, en vocation secondaire mais non négligeable, il est possible de transformer (transmuter) des éléments parmi les plus radiotoxiques présents dans les déchets, en éléments à vie courte.

Mais des difficultés technologiques affectant le fonctionnement de Superphénix, une croissance de la demande en énergie plus faible que celle prévue dans les années 1970, la chute du cours de l'uranium conduisent à différer le développement de cette filière.

En 1997, une décision, visant à donner satisfaction au lobby des opposants à l'énergie nucléaire, conduit à l'arrêt et au démantèlement de Superphénix, transformant des difficultés en renoncement. Ce renoncement a forcément eu un impact sur la crédibilité française dans ce domaine d'avenir. Les études sur la destruction des déchets sont reportées sur le réacteur Phénix, dont la vocation expérimentale est affermie jusqu'à son arrêt.

Dès 1985, EDF prend la décision de recycler dans une partie de ses réacteurs producteurs d'électricité, du plutonium extrait dans les usines de retraitement sous forme d'un combustible mixte composé d'oxyde d'uranium appauvri et d'oxyde de plutonium, dénommé MOX. Le plutonium fissile remplace l'uranium 235 et économise par la même occasion l'uranium naturel ainsi que son enrichissement.

Un combustible REP peut contenir jusqu'à 10 % de plutonium et 90 % d'uranium appauvri. Au déchargement du réacteur, la teneur en plutonium d'un combustible MOX usé n'est plus que de 4,5 %, la consommation en plutonium d'un assemblage MOX compense la production en plutonium de deux assemblages combustibles standards à l'uranium. Il est à noter que ce type de combustible a été utilisé dans des réacteurs en Belgique, en Allemagne et au Japon depuis près de quarante ans, d'abord à titre expérimental puis progressivement de façon industrielle.

Actuellement, environ 1000 tonnes de combustible uranium et 100 tonnes de combustible MOX sont déchargées chaque année en France du parc de réacteurs à eau sous pression.

Les actions de recherche et développement en cours visent essentiellement :

- à obtenir des combustibles MOX présentant un niveau énergétique équivalent aux assemblages combustibles uranium actuel
- à optimiser la teneur en plutonium dans le mélange d'oxydes

L'objectif final actuel est d'atteindre la parité, c'est-à-dire l'égalité entre les flux de plutonium produit et séparé et le flux de plutonium consommé. Il faut signaler qu'un réacteur du type EPR a été conçu pour pouvoir être chargé totalement en combustible MOX contre 30 % dans les REP 900 (les REP 1300 et 1450 ne sont pas conçus pour utiliser du MOX).

6. OPTIMISATION DE LA VALORISATION DU PLUTONIUM DE RETRAITEMENT

Deux options peuvent être retenues pour la valorisation du plutonium de retraitement (voir synoptique du tableau 1 ci-dessous) :

Option 1 : Recyclage du plutonium de retraitement dans les réacteurs à eau légère actuels (REP et EPR)

Option 2 : multirecyclage du plutonium dans les réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération

La première option répond à un besoin à court terme et la seconde à un objectif visé à l'échéance 2040/2050. Voir également la [fiche GAENA "Uranium"](#).

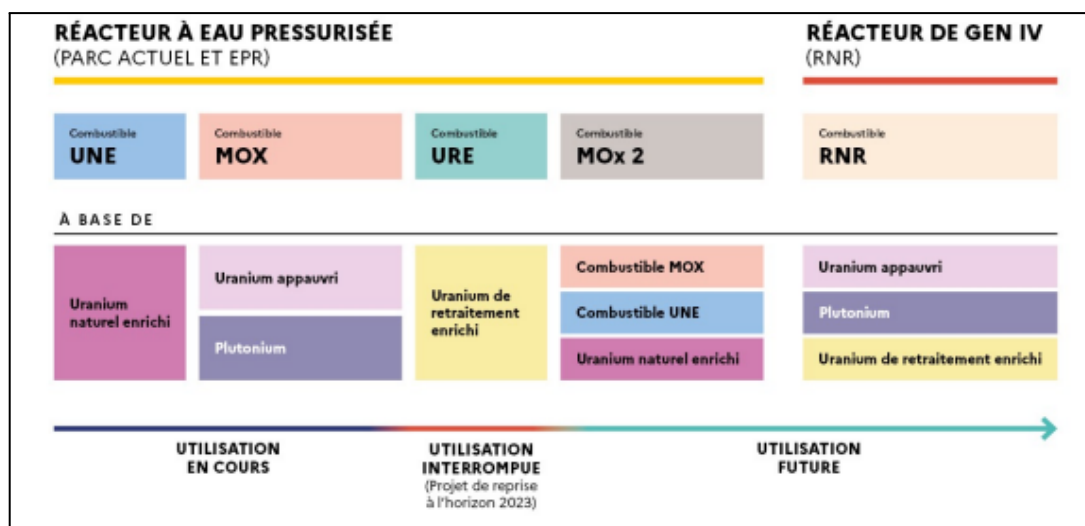


Tableau 1 : Utilisation des matières valorisables dans les réacteurs nucléaires

6.1. RECYCLAGE DU PLUTONIUM DANS LES RÉACTEURS ACTUELS (REP ET EPR)

Le combustible MOX permet de recycler une partie du plutonium issu du retraitement dans les REP actuels et les EPR en le mélangeant avec de l'uranium appauvri (Uapp) issu des opérations d'enrichissement, dont le contenu résiduel en U235 est typiquement de l'ordre de 0,25 %. Ce recyclage est cependant limité et incomplet. Il permettrait seulement de ralentir l'augmentation des stocks de plutonium.

Il faut extraire le plutonium d'environ sept assemblages de combustible utilisé pour fabriquer un assemblage MOX, qui contient au départ environ 92 % d'uranium appauvri et 8 % de plutonium. On parle de **monorecyclage**. Pour consommer tout le plutonium récupéré du retraitement, il faudrait disposer en France de 28 réacteurs capables de consommer du MOX au lieu de 20 actuellement.

Cette technique de valorisation du plutonium et de l'uranium appauvri dans la fabrication du combustible MOX est détaillée dans les **fiches argumentaires GAENA "Le traitement pour recyclage du combustible nucléaire usé"** et **"Eléments pour le choix d'un mode de gestion des combustibles usés"**.

Elle 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.

Une alternative (combustible **MOX UE**) consisterait à remplacer l'uranium appauvri du MOX par de l'uranium sorti du retraitement (URT) plus riche en ^{235}U , le plutonium apportant le complément de matière fissile. La solution MOX UE autoriserait un **multirecyclage** et serait plus efficace pour stabiliser l'inventaire en plutonium.

Cette technique de multirecyclage du Pu en REP est cependant moins performante 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 devant être mise 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' $\text{U}235$. 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.

Deux obstacles également :

- La technologie du multirecyclage n'est pas encore qualifiée.
- 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.

6.2. MULTIRECYCLAGE DU PLUTONIUM DANS LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES (RNR)

Environ 30 % des isotopes du plutonium présents dans le MOX ne sont pas fissiles par des neutrons lents et ne peuvent pas être consommés dans les réacteurs conventionnels du type REP. Pour consommer tout le stock de plutonium, une alternative optimale consisterait à recourir au multirecyclage dans les **réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération**..

En effet les réacteurs à neutrons rapides présentent des propriétés particulières qui les différencient des réacteurs à eau sous pression :

- Ils permettent une transformation plus efficace du plutonium 238 en plutonium 239 fissile de bonne qualité par capture neutronique.
- Ils permettent de fissionner tous les isotopes du plutonium. Cela ouvre la voie au multirecyclage de l'uranium et du plutonium et, par conséquent, à une gestion durable des matières nucléaires.*
- Leur grande inertie thermique et l'absence de pression sont des plus favorables en matière de sûreté nucléaire.

Le tableau 2 en page suivante montre clairement les performances inégalables des surgénérateurs (colonne 4), qu'il s'agisse de la consommation ou de la production de déchets ultimes.

Ce tableau présente une estimation des quantités de matières consommées et des quantités de déchets produits selon que le multirecyclage est réalisé en réacteur à neutrons lents (REP ou EPR) ou en réacteur à neutrons rapides.

C'est pourquoi le recours aux RNR de 4^{ème} génération prend tout son intérêt dans l'optique d'une économie de matières durable. Cette option permettrait de mettre en place un système de multirecyclage de l'uranium et du plutonium selon le principe suivant :

- Le plutonium contenu dans les combustibles MOX usés en provenance des REP actuellement entreposés, servirait à constituer la première charge des RNR (10 à 20 tonnes par RNR),
- Les importants stocks d'uranium appauvri entreposés permettraient d'alimenter dans la durée les RNR (*les RNR permettent la transformation in situ de ^{238}U en ^{239}Pu fissile, et ils peuvent être recyclés à l'infini*).

L'annexe 1 détaille cette option de multirecyclage de l'uranium et du plutonium dans un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR).

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

Tableau 2 : Performances comparées de différentes options de recyclage

6.3. ÉLÉMENTS DE RÉFLEXION POUR UNE POLITIQUE NUCLÉAIRE DURABLE

Une vision rationnelle du développement de l'énergie nucléaire sur le long terme doit impérativement s'affranchir de la dépendance aux approvisionnements en uranium naturel. Seuls les 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.

À 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 :

- La France bénéficie d'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.
- Elle possède un savoir-faire industriel majeur 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 en 2024). 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.

7. MAÎTRISE DES RISQUES

Les dangers associés à la mise en œuvre du plutonium sont bien connus. Leur maîtrise passe essentiellement par le confinement de l'élément. Les techniques utilisées n'ont rien d'exceptionnel. Elles ont été développées depuis plus de cinquante années comme celles auxquelles il a été fait appel pour le confinement des substances biologiques dangereuses (toxines – virus) ou inversement pour la protection de produits ou matériels sensibles (salles blanches - atmosphères stériles ou chimiquement neutres).

Le risque de rassemblement de quantités de plutonium pouvant conduire à une réaction de fission incontrôlée (criticité) est maîtrisé par une comptabilité stricte limitant les masses et par la géométrie (forme, capacité) et la nature des équipements.

Pour les transits hors des installations et entre des établissements, ces mesures de prévention sont maintenues par, tout d'abord, l'usage d'emballages de transport spéciaux (FS 47, FS 65-1300, TN GEMINI) adaptés aux diverses formes sous lesquelles se trouve le plutonium. Ces matériels répondent tout à la fois aux nécessités de protection radiologique et de protection physique (contre toute agression) dans le cadre des règlements de transports des matières dangereuses et des matières nucléaires.

De plus, la protection des véhicules utilisés est fondée sur le concept de défense en profondeur, multipliant le nombre de barrières vis-à-vis de toute agression. Il est peut-être utile de rappeler que le déroulement d'un transport de matières nucléaires demeure sous surveillance permanente. Les dispositifs techniques, les modes opératoires et l'exécution des transports font l'objet de très fréquentes inspections auxquelles s'ajoute la vigilance des organisations opposées à l'industrie nucléaire. À l'abri de toute banalisation, les transferts entre les sites industriels nécessitent annuellement, en France, environ deux cents transports de ce type.

7. CONCLUSION

Le plutonium formé actuellement lors de la production d'électricité par le parc nucléaire a une valeur énergétique certaine et démontrée.

Sa gestion actuelle par l'électricien national permet une maîtrise des stocks en conservant toutes les options ouvertes pour l'avenir.

Cependant il est évident que le développement durable de la production d'énergie par fission nucléaire passe par la mise en œuvre de réacteurs à neutrons rapides permettant tout à la fois la valorisation énergétique du plutonium, la destruction de certains déchets et surtout l'utilisation optimale des ressources mondiales en uranium.

Sur les six options étudiées pour la génération IV (voir [fiche argumentaire GAENA "Génération IV"](#)), la moitié concerne des réacteurs à neutrons rapides.

5. FICHES GAÉNA LIÉES

Fiche argumentaire GAENA : ["Génération IV"](#). Index de classement : ACB 03

Fiche argumentaire GAENA : ["Principe de précaution"](#). Index de classement : BA 01

Fiche argumentaire GAENA : ["Uranium"](#). Index de classement : DDA 03

Fiche argumentaire GAENA : ["Les réacteurs nucléaires naturels d'Oklo"](#). Index de classement : DDA 01

Fiche argumentaire GAENA : ["Traitement pour recyclage du combustible"](#). Index de classement : ACD 02

Fiche argumentaire GAENA : ["Choix d'un mode de gestion du combustible usé"](#). Index de classement : ACD 04

6. AUTRES RÉFÉRENCES

[Réf. 1] Utilisation du plutonium <https://laradioactivite.com>

[Réf. 2] **CEA** : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

[Réf. 3] **WIKIPEDIA**

[Réf. 4] Rapport N° 1359 sur l'aval du cycle nucléaire par Christian Bataille et Robert Galley
<https://www.assembleenationalefr.rap-oecst/nucleaire/r1359-16.asp>

[Réf. 5] Rapport de la Cour des comptes du 4 juillet 2019 : L'aval du cycle du combustible nucléaire – Les matières et les déchets radioactifs, de la sortie du réacteur au stockage <https://www.ccomptes.fr/>

[Réf. 6] Rapport du HCTISN (Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire) : Présentation du « Cycle du combustible français en 2018 » <http://www.hctisn.fr/>

[Réf. 7] Le multirecyclage du plutonium en REP, une stratégie perdante ! Article de Dominique Grenèche.
<https://www.pnc-France.org>

- Composition du combustible utilisé, en sortie de réacteur avant recyclage : plutonium (20 %) – uranium (~75%) – produits de fission (5 %) – actinides mineurs (0,3 %)
- Produits de fission (déchets HA) : ~50 tonnes/an (idem cycle actuel)
- Besoin en uranium appauvri : ~50 tonnes/an (à comparer à 8 000 tonnes d'uranium naturel par an pour le cycle actuel) [On retire in fine environ 100 fois plus d'énergie de chaque gramme d'uranium naturel dans les systèmes utilisant des RNR]
- Besoin en plutonium au démarrage : ~ 20 tonnes pour chacun des réacteurs à mettre en service (pour mémoire, le stock de plutonium dans les combustibles MOX usés s'accroît d'environ 7 tonnes par an dans le cycle actuel). Soit environ 1 000 tonnes de plutonium pour un parc de 50 réacteurs RNR.

Transition entre le « cycle actuel » et le « cycle envisagé »

L'éventuelle perspective d'un multirecyclage de l'uranium et du plutonium dans un parc où seraient progressivement déployés des réacteurs à neutrons rapides appellerait successivement :

- Le traitement des combustibles MOX-REP, aujourd'hui entreposés, pour récupérer les matières valorisables (et notamment le plutonium) qu'ils contiennent (des campagnes industrielles, portant sur près de 70 tonnes de combustibles MOX usés, ont permis de vérifier la faisabilité de principe de telles opérations) ;
- La fabrication de combustibles MOX-RNR à partir du plutonium récupéré ;
- Le traitement (récurrent pour atteindre le multirecyclage) des combustibles MOX-RNR usés. Des campagnes portant sur 25 tonnes de combustibles Phénix ont permis de vérifier la faisabilité de principe de telles opérations. À partir d'une tonne d'uranium naturel, on pourrait produire à l'aide de ces réacteurs jusqu'à environ cent fois plus d'énergie qu'avec des réacteurs à eau pressurisée.