

## LE PLUTONIUM

### PRÉAMBULE

La production d'énergie par réactions nucléaires requiert des atomes fissiles (qui peuvent être cassés par des neutrons), dans la nature, seul existe l'uranium-235 qui, associé à l'uranium-238 largement prépondérant, produit du plutonium 239<sup>1</sup>.

Dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, l'homme n'a fait qu'imiter la nature. Contrairement à une opinion très répandue, le plutonium n'est pas un élément artificiel créé par des apprentis sorciers ne se souciant pas des conséquences de leurs actes.

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 GASN N°14](#)). 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 la domestication 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. A 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 (deutons) 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 microgramme 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 ZOE 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 Chatillon. 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.

### 1. 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 du Pu 239 est de 24 110 ans.

<sup>1</sup> A noter que dans le cadre de Génération-IV (voir [fiche GASN N°22](#)), 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-233, isotope naturel fertile, et consommer le thorium naturel.

C'est un métal argenté brillant, 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.

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.

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.

## 2. 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 de la firme 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 masses égales.

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 GASN N°11](#), 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](http://www.cea.fr)).

## 3. PRODUCTION DU PLUTONIUM

Les réactions de fission de l'uranium 235 qui se produisent dans le combustible des réacteurs nucléaires s'accompagnent de réactions de capture de neutrons par l'uranium 238 contenu également dans ce combustible. Cette capture transforme cet isotope principalement en plutonium 239, puis en isotopes plus lourds (240, 241,...).

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

Le plutonium qui se forme dans les combustibles 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 contribue pour un tiers à la production d'énergie libérée par un 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 considérable. En effet, sa fission peut libérer une énergie de 220 millions de kWh et donc générer 70 millions de kWh d'électricité.

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 de 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.

#### 4. 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 (Phénix ou Superphénix).

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 ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Pu}$ ) 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.

Outre sa vocation de consommation et de valorisation du plutonium, cette filière de réacteurs à neutrons rapides (RNR) présente également 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 (incinérer) des éléments parmi les plus radiotoxiques présents dans les déchets, en éléments à vie courte. A ce stade du développement, il est envisagé le projet d'un parc de plusieurs réacteurs rapides associés à des installations de retraitement et de fabrication de combustibles.

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 et à privilégier la capacité des installations pour la destruction des déchets.

Enfin, 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, maintenu en survie.

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.

Un combustible MOX peut contenir jusqu'à 7% de plutonium et 93% 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 est utilisé dans des réacteurs en Belgique et en Allemagne 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. Après un séjour dans les piscines de réacteurs, les assemblages sont transportés à l'usine de retraitement de la Hague. Chaque année également, 850 tonnes de combustibles sont retraitées, produisant environ 8,5 tonnes de plutonium séparé, destiné à être recyclé sous forme de MOX.

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 obtenir une teneur en plutonium maximale dans le mélange d'oxydes

L'objectif final 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 peut être chargé totalement en combustible MOX.

## 5. 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 de conteneurs 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.

A l'abri de toute banalisation, les transferts entre les sites industriels nécessitent annuellement, en France, environ deux cents transports de ce type.

## 6. 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 GASN N°22](#)), la moitié concerne des réacteurs à neutrons rapides.