

Brûler les actinides: une option complémentaire?

*La séparation et la transmutation des actinides
et des produits de fission peuvent être un nouvel élément
des stratégies de gestion des déchets*

par L.H. Baetsle

La capacité électronucléaire mondiale s'élève à près de 340 gigawatts électriques (GWe) et produit du combustible irradié représentant quelque 9000 tonnes de métal lourd (tML) chaque année. Chaque tonne de combustible irradié contient environ 10 kg d'actinides transuraniens, dont 0,8 kg d'actinides mineurs, et 30 kg de produits de fission, dont 4 kg de nucléides à période longue (supérieure à 30 ans).

Le devenir du combustible irradié dépend dans une large mesure de la politique nationale en matière de cycle du combustible. Pour la moitié de la capacité électronucléaire mondiale, on pratique le retraitement, la récupération du plutonium, la vitrification des résidus et l'évacuation des déchets. C'est ce que font notamment la France, le Royaume-Uni, le Japon, l'Allemagne, la Belgique, la Suisse, la Communauté d'Etats indépendants et les pays de l'ancien bloc soviétique. De grandes installations de retraitement ont été construites et sont en service en France et au Royaume-Uni, et d'autres sont en construction au Japon et en Russie.

L'autre moitié de la capacité nucléaire mondiale produit du combustible irradié comme déchet. C'est ce que l'on appelle le «cycle ouvert», adopté aux Etats-Unis, au Canada, en Suède, en Espagne et dans quelques autres pays. La tendance actuelle consiste à stocker pour une longue période le combustible irradié dans des installations artificielles avant de l'évacuer dans des formations géologiques appropriées.

Les actinides transuraniens s'accumulent à raison d'environ 90 tML par an. Environ 45 tonnes resteront incorporées dans les structures du combustible irradié, et 45 tonnes seront donc disponibles, à raison de 92% sous forme de plutonium recyclé et de 8% sous forme d'actinides mineurs (neptunium, américium, curium) immobilisés dans des déchets vitrifiés.

Les déchets vitrifiés sont stockés dans des installations artificielles avant d'être évacués définitivement dans des dépôts souterrains. Du point de vue de l'environnement, l'évacuation des déchets vitrifiés de haute activité contenant des actinides mineurs et

celle du combustible irradié contenant du plutonium et des actinides mineurs sont très similaires, du moins pendant les dix premiers millénaires. Au-delà de cette période — qui correspond à la durée de vie technique d'un dépôt souterrain — le combustible irradié contenant tout le plutonium devient le risque principal pour l'environnement.

Intérêt pour la séparation et la transmutation

Il y a 20 ans, on se demandait déjà si le risque à long terme associé aux actinides transuraniens et aux produits de fission à période longue pouvait être évité. D'importants programmes de recherche-développement ont été consacrés dans la Communauté européenne et aux Etats-Unis à l'étude de cette question, mais leur succès a été très limité. On s'est vite rendu compte qu'il était pratiquement impossible d'éliminer tous les actinides transuraniens et que certains produits de fission, comme le technétium 99, le césium 135 et l'iode 129, étaient tout aussi importants dans l'évaluation de la dose délivrée à l'homme à l'horizon d'un million d'années.

On observe toutefois un regain d'intérêt pour la séparation et la transmutation, principalement en raison des difficultés rencontrées dans le monde entier pour trouver des formations géologiques appropriées dans des lieux acceptables pour le public.

En 1988, la Commission de l'énergie atomique du Japon a lancé un ambitieux programme de recherche-développement (voir l'article suivant), qui vise l'élimination des risques à long terme résultant de la production d'énergie nucléaire et l'utilisation optimale des ressources. Cette initiative a incité d'autres grands pays nucléaires, comme la France, à entreprendre des programmes de recherche pour améliorer ou adapter le procédé PUREX actuellement utilisé. L'objectif est de réduire la teneur en plutonium des déchets de haute activité et d'éliminer les actinides mineurs en instituant des étapes nouvelles ou supplémentaires d'extraction.

La stratégie de séparation-transmutation ne peut être mise en œuvre que dans le cadre d'une politique du cycle du combustible faisant du retraitement une

M. Baetsle est conseiller du président et de la direction générale du Centre d'études de l'énergie nucléaire (SCK/CEN) de Mol, en Belgique.

étape fondamentale comportant le recyclage de tous les actinides majeurs (uranium, plutonium), et capable d'isoler les actinides mineurs et certains produits de fission à période longue des effluents pour les préparer aux étapes ultérieures de la transmutation.

Stratégies et schémas généraux

Le fondement de la stratégie générale consistant à introduire la séparation-transmutation comme nouvelle option de gestion des déchets est l'avantage radiologique que l'on attend d'elle. Le choix des actinides et des produits de fission à période longue dont l'élimination par transmutation serait bénéfique dépend d'un certain nombre de facteurs techniques, parmi lesquels les facteurs risque et décontamination, et de l'effet du confinement géologique*. Les produits de fission à période longue sont beaucoup moins toxiques que les actinides, si l'on considère les indices de risque une fois achevée la décroissance du strontium 90 et du césium 137, c'est-à-dire après environ 600 ans. (*Voir les tableaux de la page 34 pour un classement des actinides et des produits de fission d'après leurs facteurs de risque.*)

Il y a deux moyens d'aborder la séparation des actinides mineurs et des produits de fission à période longue à partir des flux de retraitement: soit modifier les procédés actuels pour réorienter les nucléides critiques vers une solution unique, par exemple des déchets liquides de haute activité, à laquelle seraient appliqués des procédés de séparation, soit étendre le procédé PUREX classique à tous les actinides mineurs et produits de fission à période longue dans des installations de retraitement de deuxième génération.

Avant de mettre en pratique l'un ou l'autre de ces schémas, il semble indispensable d'améliorer le rendement de séparation du plutonium des déchets de haute activité dans les installations actuellement exploitées. La réorientation des nucléides vers un même flux de produits ou de déchets est très importante dans le cas du neptunium, qui est présent dans de nombreux flux de procédés.

L'introduction d'une étape pour la récupération du technétium est importante non seulement dans une stratégie de séparation-transmutation, c'est aussi un moyen de réduire la contamination par l'uranium et le plutonium.

Il existe un certain nombre de réactifs pour la séparation des actinides, dont le plus prometteur, pour le moment, est le CMPO, qui peut être utilisé en conjonction avec le tributylphosphate (TPB) dans le procédé TRUEX. Bien que des recherches soient encore nécessaires, on peut prévoir que, moyennant un financement suffisant, cette technique de séparation, ou une technique similaire, aboutira à un

procédé fiable compatible avec le procédé PUREX.

La séparation produira des éléments uniques ou des groupes d'éléments qui seront soumis aux procédés de transmutation (neptunium, américium, curium), ou qui peuvent devenir des ressources stratégiques pour l'avenir (éléments des groupes technétium et platium).

Le classement des produits de fission n'est pas modifié par le confinement en formation géologique. Le technétium 99 et l'iode 129 continuent d'occuper un rang élevé sur la liste de ceux qui sont à examiner dans le cadre d'une option de séparation-transmutation, en raison de leur mobilité dans la géosphère.

En conclusion, on peut postuler qu'une stratégie de séparation-transmutation devrait assurer à l'humanité une protection radiologique équivalente à celle de l'évacuation géologique. Le choix des nucléides à séparer et à transmuter, et la mesure dans laquelle ils doivent être éliminés, sera le résultat d'un arbitrage entre la baisse de confiance dans les avantages de l'évacuation en formation géologique, imputable au fait que l'horizon temporel devient inconcevable à l'échelle humaine, et la hausse des coûts de gestion des déchets qui entraîneront l'amélioration du retraitement et la séparation-transmutation.

La séparation-transmutation des actinides n'est pas une option de remplacement de la gestion des déchets à long terme, mais une technique complémentaire de l'évacuation en formation géologique, capable de réduire encore l'impact radiologique à très long terme du cycle du combustible.

Recyclage des actinides mineurs

Si la séparation était mise en œuvre dans les grandes unités de retraitement (La Hague, Sellafield, Rokkashomura, etc.), on obtiendrait chaque année environ 1700 kg de neptunium 237 et 1500 kg d'américium (et quelques kilogrammes de curium), chiffres qui correspondent approximativement à 44% de la production mondiale totale.

Selon la méthode de transmutation appliquée, les actinides mineurs seraient conditionnés sous forme d'oxydes ou de métaux dans des installations de fabrication du combustible spécialement équipées qui devraient être construites à cette fin. Suivant le type de recyclage (homogène ou hétérogène), il faudrait une capacité de fabrication de l'ordre de 68 à 85 tonnes d'oxydes mélangés (MOX) par an. Ces installations seraient étroitement associées aux activités des installations de retraitement.

La production de combustible métallique repose sur un procédé de raffinage pyrométallurgique qui en est actuellement au stade des études au banc d'essai aux Etats-Unis et au Japon. Il faudrait construire des installations de retraitement à sec/fabrication du combustible d'une capacité totale de 80 tML par an pour traiter la production d'actinides mineurs des Etats-Unis et de quelques autres pays.

* Des précisions techniques complètes peuvent être obtenues de l'auteur.

Actinides présents dans les déchets de haute activité

	CIPR-61	1/TML
1	²⁴¹ Am	3,3 – 12,3 × 10 ¹³
2	²⁴³ Am	1,8 – 2 × 10 ¹²
3 (1%)	²⁴⁰ Pu	7,6 – 8 × 10 ¹¹
4 (1%)	²³⁹ Pu	3,2 – 3,5 × 10 ¹¹
5	²³⁷ Np	4,7 – 6,4 × 10 ¹⁰
6	²⁴⁶ Cm	2,4 – 2,7 × 10 ¹⁰

Produits de fission

	Nucléides	1/TML
1	⁹⁰ Sr	3,9 × 10 ¹² – 2,13 × 10 ⁴
2	¹³⁷ Cs	3,8 × 10 ¹² – 3,66 × 10 ⁴
3	⁹⁹ Tc	1,6 × 10 ⁹
4	¹²⁶ Sn	6,6 × 10 ⁸
5	¹²⁹ I	5,8 × 10 ⁸
6	¹³⁵ Cs	1,3 × 10 ⁸
7	⁹³ Zr	9,4 × 10 ⁷

Notes: Ces classements sont fondés sur le critère figurant dans la publication 61 de la Commission internationale de protection radiologique. Ils sont établis d'après le volume d'eau potable nécessaire pour diluer un mélange de radionucléides de façon que la concentration finale corresponde aux limites admissibles prévues pour l'eau potable. Les actinides sont classés en fonction des risques qu'ils présentent lorsqu'ils sont contenus dans des déchets de haute activité refroidis pendant 200 à 1000 ans.

Classement des produits de fission à vie longue et des actinides en fonction du risque radiologique

Mais ces installations ne seraient pas reliées aux activités traditionnelles de retraitement. Elles feraient intégralement partie de complexes de réacteurs rapides destinés à brûler des actinides et dont la capacité spécifique dépendrait de la puissance du réacteur de chaque site.

Transmutation des actinides mineurs

En principe, il est possible de transmuter les actinides mineurs dans les centrales nucléaires existantes. Toutefois, le processus est lent et produit essentiellement des nucléides plus lourds, et il est difficile de réutiliser fréquemment les matières provenant du combustible irradié si l'on opte pour un recyclage homogène. Le recyclage hétérogène des actinides mineurs dans des éléments combustibles fabriqués spécialement n'est pas encore suffisamment au point. La transmutation de l'américium est possible dans certaines conditions.

La transmutation la plus efficace des actinides mineurs se produit dans des réacteurs à neutrons rapides capables de transformer les actinides en produits de fission. Un point très important à noter est l'inventaire abondant des actinides mineurs dans un réacteur rapide, ce qui permet de transférer la quasi-totalité de la production annuelle dans un réacteur d'«incinération». Toutefois, le rendement annuel net d'incinération ne dépasse guère 5% environ.

Des réacteurs spécialement conçus pour brûler le plutonium et les actinides mineurs produits par un réacteur à eau ordinaire sont à l'étude, par exemple l'Integral Fast Reactor (IFR) aux Etats-Unis et le Minor Actinide Burner Reactor (MABR) au Japon.

Approches et autres solutions possibles

La séparation-transmutation est en train de devenir un outil supplémentaire de la stratégie générale de gestion des déchets visant à réduire l'impact radiologique des actinides et des produits de fission à période longue. Mais elle ne se substitue pas totalement à l'évacuation en formation géologique.

L'amélioration du retraitement peut sensiblement réduire la teneur en plutonium des déchets de haute activité. Certaines techniques de séparation de l'américium et du curium sont prometteuses et la réorientation du neptunium dans le retraitement classique est bénéfique.

L'existence d'un système complet de séparation, portant sur tous les actinides mineurs et produits de fission à période longue, est encore une perspective éloignée et demandera des efforts intensifs de recherche-développement.

La fabrication d'aiguilles de combustible ou de cibles d'irradiation est une étape très importante de la stratégie globale de séparation-transmutation. Elle requiert elle aussi une analyse technique et économique approfondie dans le cadre d'une technologie globale de la transmutation.

La transmutation est un procédé qui prend du temps et exige des réacteurs à haut flux et/ou à flux de neutrons énergétiques. De tels flux neutroniques existent dans les réacteurs à haut flux et les réacteurs rapides. Le rendement de transmutation dans des réacteurs spécifiques (IFR, MABR) est relativement élevé. Néanmoins, le temps nécessaire pour détruire les nucléides est très long (20 à 30 ans) et dépend du temps de refroidissement et de la durée du cycle du combustible. Les réacteurs couplés à un accélérateur constituent des installations d'irradiation dont les flux sont à peu près dix fois plus élevés et pourraient raccourcir sensiblement les périodes d'irradiation.

Il faut analyser de façon très poussée les aspects économiques de la séparation-transmutation. Cela est important, car l'amélioration du retraitement, de la séparation chimique, de la fabrication des cibles et des éléments combustibles, de la mise au point de réacteurs rapides et des opérations de recyclage pour le combustible contenant des actinides mineurs nécessite la construction et l'exploitation d'installations importantes du cycle du combustible nucléaire. Elle suppose aussi la mise au point de technologies matures de séparation et de transmutation applicables à des quantités industrielles.

Il faut comparer ces efforts aux problèmes associés à l'acceptation par le public des dépôts géologiques et aux risques différés dus à la migration de nucléides à très longue période dans les couches géologiques. La volonté d'abaisser les coûts de l'évacuation géologique devrait être l'incitation économique en faveur de la séparation et de la transmutation, et les mesures destinées à réduire au minimum la radioexposition des êtres humains devraient être la motivation à réduire l'impact radiologique à long terme de la production d'électricité nucléaire.