

# Énergie ET Sécurité

NO. 3 1998 UNE PUBLICATION D'IEER

## L'utilisation du plutonium militaire comme combustible de réacteur

ARJUN MAKHIJANI ET ANITA SETH

**A** la fin de la Guerre froide, les États-Unis et la Russie ont à faire face à un problème inattendu et sans précédent: les surplus de plutonium et d'uranium hautement enrichi, les deux matériaux clés utilisés pour la fabrication des armes nucléaires. Des deux, l'uranium est, en principe, un moindre problème puisqu'il peut être transformé, par dilution, en uranium faiblement enrichi, lequel est largement utilisé dans les réacteurs nucléaires. En 1993, les États-Unis et la Russie ont signé un accord par lequel les États-Unis s'engageaient à acheter, sur une période de 20 ans, 500 tonnes d'uranium russe hautement enrichi, dilué en Russie pour le rendre utilisable comme combustible pour réacteurs. Bien que la mise en œuvre de cet accord ait été lente au départ, elle se fait maintenant au rythme convenu.

En revanche, la transformation du surplus de plutonium pour le rendre inutilisable pour la fabrication des armes nucléaires pose beaucoup plus de problèmes. Les États-Unis ont déclaré un surplus<sup>1</sup>, d'environ 50 tons (sur un total d'environ 100 tonnes), alors que la Russie n'a pas encore officiellement annoncé le sien. On estime le total de plutonium militaire russe à 130 tonnes, peut-être même plus.

Les États-Unis et la Russie ne sont pas d'accord sur la meilleure façon de gérer le surplus de plutonium militaire. Le Ministère russe à l'Énergie atomique (Minatom) considère le plutonium comme une ressource énergétique de valeur, alors que l'opinion qui prévaut aux États-Unis considère (en dépit de certains désaccords

LIRE LA SUITE, PAGE 12  
Voir la page 18 pour les annotations

### EDITORIAL

## L'évacuation du plutonium: la voie royale de sa Renaissance?

**A**ux États-Unis et en Russie l'évacuation des surplus de plutonium provenant des armes est un objectif urgent de non-prolifération. Cependant, la voie dans laquelle ils se sont engagés, qui favorise la conversion du surplus de plutonium en

combustible MOX, pose de sérieux problèmes de prolifération et de sécurité. L'utilisation du MOX comme moyen de se débarrasser du plutonium permettrait la mise en place d'une infrastructure d'installations et d'intérêts financiers, favorisant une économie du plutonium à long terme, donc des risques de prolifération supplémentaires.

En donnant leur accord pour l'utilisation du MOX, les États-Unis espéraient que la Russie accepterait de ne pas retirer le combustible MOX irradié et de ne pas utiliser les usines construites pour l'élimination du surplus de plutonium des armes à des fins commerciales. Ces espoirs ne se concrétisent pas. Au contraire, sous couvert d'élimination, les



ROBERT DEL TREDICI

▲ Les boîtes à gants sont utilisées pour travailler avec le plutonium, qui même en quantité minime pose de sérieux risques pour la santé.

LIRE LA SUITE, PAGE 2

### DANS CE NUMÉRO

Les effets du plutonium sur la santé .....	3
Le MOX en France, Belgique et en Russie .....	5, 6
La transmutation n'est pas une alternative à l'enfouissement .....	9

États-Unis semblent non seulement avoir abandonné leur politique, vieille de plusieurs décennies, de non-utilisation du plutonium dans les réacteurs commerciaux, mais même de se rendre complice des visées russes de mettre sur pied une économie du plutonium.

L'étude commune russo-américaine sur l'évacuation du plutonium [Joint US/Russian Plutonium Disposition Study], signée par les conseillers scientifiques des présidents Clinton et Eltsine (voir l'article principal) montre bien cet assentiment: "Pour faciliter l'objectif d'élimination aussi vite que possible, si l'option réacteur est poursuivie, les matières [nucléaires] qui en résulteraient ne devraient pas être retraitées ou recyclées au moins jusqu'à ce que les excédents actuels des stocks de plutonium séparé soient éliminés. Une fois cela accompli, des décisions finales pourront être prises pour savoir si le combustible très radioactif, contenant du plutonium, provenant de l'option réacteur, devrait être enfoui directement dans des couches géologiques profondes, le choix des États-Unis; ou pourrait être éventuellement retraité pour récupérer le plutonium, le choix de la Russie."<sup>1</sup> Plus loin, le rapport est encore plus clair: "...La Russie, finira bien par recycler tout le plutonium qui reste dans le combustible [MOX irradié]." Et, "l'objectif d'élimination des États-Unis" semble être satisfait si le combustible MOX irradié "est entreposé pendant plusieurs décennies avant d'être retraité."<sup>2</sup>

Mais il importe peu que le MOX soit recyclé maintenant ou dans quelques dizaines d'années. Du moment que l'infrastructure pour la production du MOX est créée et entretenue, il y aura quantité d'autre combustible irradié à retraiter et du plutonium en surplus pour occuper, entre temps, les usines de fabrication de MOX. En outre, si la Russie retraite le MOX irradié, l'idée d'utiliser le MOX pour emprisonner le surplus de plutonium dans une matrice très radioactive empêchant sa réutilisation pour les armes s'avérerait un échec. Bien que le gouvernement russe ne veuille pas utiliser de plutonium de qualité réacteur dans les armes, il est possible que des gouvernements sans armes nucléaires ou des organisations terroristes soient prêts à payer cher pour ce matériau utilisable pour les armes. De plus, il est possible que l'utilisation du plutonium de qualité militaire dans les surgénérateurs ne dégrade pas sa composition isotopique d'une façon significative. En fait, quand les surgénérateurs fonctionnent avec des couvertures fertiles d'uranium, ils peuvent être utilisés pour obtenir du plutonium de qualité militaire à partir de plutonium de qualité réacteur. L'argent restera probablement la limite la plus importante pour les réacteurs et les usines de retraitement.

Le rapport note également que "il n'est pas clair si les dépenses de démantèlement des usines MOX,

construites principalement pour la production d'électricité [en Russie], devrait être attribuées au programme d'évacuation du plutonium puisqu'il est possible que ces usines soient utilisées par un programme civil de plutonium une fois le programme d'évacuation du plutonium terminé."<sup>3</sup> Une usine de fabrication de MOX, utilisée à des fins commerciales, une fois le programme d'élimination du plutonium militaire terminé, fournirait le maillon manquant aux projets russes d'économie du plutonium.

Ainsi, le résultat final du programme d'élimination du plutonium aura été, de la part des États-Unis, de subventionner précisément ce qu'ils auraient dû décourager: une infrastructure pour une économie du plutonium en Russie. Il est intéressant de remarquer, et ce n'est peut-être pas une coïncidence, qu'une infrastructure semblable sera créée aux États-Unis puisqu'une usine de MOX serait construite et que les États-Unis semblent être de plus en plus réticents à fermer leurs usines de retraitement militaire vieilles de plusieurs dizaines d'années sur le site de Savannah River Site en Caroline du Sud.

En échange les États-Unis gagneraient quelques décennies avant le retraitement du MOX irradié russe et, on peut l'espérer, la pleine collaboration russe dans la comptabilité des matières nucléaires. Mais jusqu'ici, la Russie, contrairement aux États-Unis n'a déclaré aucun surplus, et encore plus grave, n'a déclaré aucune production.

LIRE LA SUITE, PAGE 20

## Énergie & Sécurité

### Crédits pour ce numéro

Traduction: Annie Makhijani

avec la collaboration de: Jean Luc Thierry

Mise en page: Cutting Edge Graphics, Washington D.C.

Photos: Robert Del Tredici, Atomic Photographers Guild

Énergie et Sécurité est gratuit pour tous.

Rédactrice en chef: Anita Seth

Le troisième numéro de la version française a été publié en janvier 1997.

### Merci à ceux qui nous soutiennent

Nous remercions sincèrement les institutions dont le généreux soutien financier a rendu possible notre projet mondial sur "les dangers des matières nucléaires."

• W. Alton Jones Foundation • John D. And Catherine T. MacArthur Foundation • C.S. Fund • HKH Foundation • New Land Foundation •

Nous remercions également les institutions qui financent notre projet d'aide technique pour les organisations militantes. Nous nous inspirons beaucoup de ce projet pour notre projet mondial.

• Public Welfare Foundation • John Merck Fund • Ploughshares Fund • Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock • Rockefeller Financial Services • Stewart R. Mott Charitable Trust • Town Creek Foundation • Beldon II Fund • DJB Foundation •

# Les effets du plutonium sur la santé

ARJUN MAKHIJANI

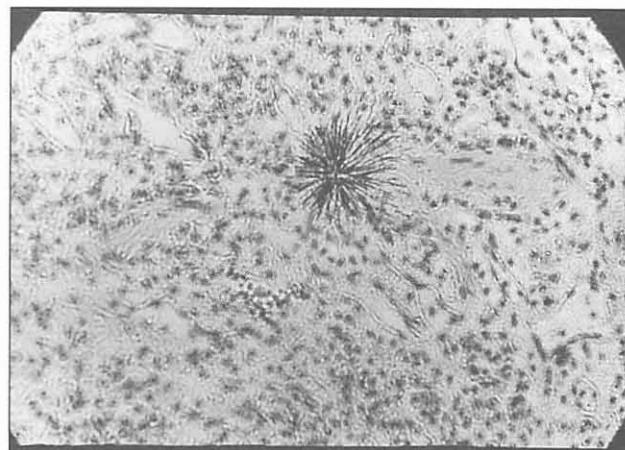
**L**e plutonium-239 est une substance cancérigène très dangereuse pouvant être aussi utilisée pour la fabrication des armes nucléaires. Cette combinaison de propriétés en fait une des substances les plus dangereuses. Bien qu'il y ait d'autres substances cancérigènes plus radioactives, comme par exemple le radium-226, contrairement au plutonium-239, elles ne peuvent pas être utilisées pour fabriquer des armes nucléaires ou n'existent pas en quantités suffisantes. L'uranium hautement enrichi peut aussi être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires, mais il est environ mille fois moins radioactif que le plutonium-239. Le danger est encore accru du fait qu'il est relativement difficile de détecter le plutonium-239 une fois qu'il est hors d'installations aménagées du point de vue sécurité et dotés d'instruments de détection, ou une fois qu'il est incorporé dans l'organisme. En effet, le rayonnement gamma qu'il émet, et qui fournit la méthode de détection la plus facile des radionucléides, est relativement faible.

La propriété cancérigène principale du plutonium-239 découle de son rayonnement alpha très énergétique. Les particules alpha, étant lourdes, transfèrent leur énergie à d'autres atomes et molécules en moins de collisions que les électrons, beaucoup plus légers, qui sont la cause majeure des dégâts produits par les rayonnements bêta et gamma. Le trajet des particules alpha dans les tissus vivants est court. Ces particules bombardent sans cesse les cellules et les tissus avoisinants. Il en résulte des dégâts biologiques beaucoup plus importants pour la même quantité d'énergie déposée dans les tissus vivants.

L'efficacité relative avec laquelle les différents types de rayonnement infligent des dégâts biologiques varie suivant le type de rayonnement, son énergie, et l'organe du corps qui est irradié. Un simple facteur, le facteur de qualité, est utilisé, pour des raisons de normes, pour indiquer le danger relatif des rayonnements alpha, bêta, gamma, et neutroniques. À l'heure actuelle, la Commission internationale de protection radiologique (ICRP) recommande d'utiliser pour le rayonnement alpha un facteur de qualité de 20 vingt fois supérieur à celui du rayonnement gamma.<sup>1</sup>

Une fois incorporé, le plutonium-239 se dépose de préférence dans les tissus mous, notamment le foie, sur les surfaces osseuses, et dans les régions osseuses qui ne contiennent pas de cartilage. La déposition dans la moelle osseuse peut avoir des effets particulièrement néfastes sur la formation du sang qui se fait à cet endroit.

A l'extérieur de l'organisme, le plutonium est



ROBERT DEL TREDICI

▲ *L'étoile noire montre les marques faites par le rayonnement alpha émis d'une particule de plutonium logée dans le tissu pulmonaire d'un singe (grossi).*

habituellement moins dangereux que les sources de rayonnement gamma. Puisque les particules alpha transmettent leur énergie sur une courte distance, le plutonium à proximité du corps dépose pratiquement toute son énergie dans les couches externes, non vivantes de la peau, où elle ne peut pas produire d'effets biologiques nocifs.

Les photons gamma émis par la désintégration du plutonium-239 pénètrent dans l'organisme mais, comme ils sont peu nombreux et faibles, une quantité considérable de plutonium serait nécessaire pour atteindre des doses significatives de radiation gamma. C'est pourquoi, le plutonium peut être transporté sous une protection minimale, sans risques d'effets radiologiques immédiatement sérieux. L'inhalation du plutonium-239 pose le plus grand danger, plus particulièrement quand il est sous la forme d'oxyde de plutonium, une forme insoluble très répandue. L'absorption du plutonium dans le sang à partir de coupures et écorchures constitue un autre danger, surtout pour les ouvriers et (autrefois) pour les équipes qui participaient au programme d'essais nucléaires atmosphériques. Le risque d'absorption par ingestion est en général moindre que celui de l'inhalation, parce que le plutonium n'est pas facilement absorbé par la paroi intestinale, la presque totalité étant ainsi excrétée.

Le type de dégâts infligés par le plutonium-239 et la probabilité avec laquelle il produit ces dégâts dépend du mode d'incorporation du plutonium, de la forme chimique, et de la taille des particules. Les modes habituels d'incorporation par des individus du public sont l'inhalation et l'ingestion. Le plutonium peut être ingéré accidentellement par contact main bouche avec

LIRE LA SUITE, PAGE 4

de la terre contenant du plutonium, ou par la consommation d'aliment ou d'eau contaminés.

En général, le plutonium sous forme de grosses particules produit des dégâts biologiques moindres. Pour une même quantité, le plutonium est plus dangereux sous forme de fines particules. En effet, quand des particules de plus gros diamètre sont inhalées, elles tendent à être piégées par les poils nasaux, ce qui empêche leur passage dans les poumons. Les particules plus petites entrent, elles, dans les alvéoles où elles demeurent, irradiant les tissus environnants.

D'autres isotopes du plutonium émettent des rayons alpha, comme par exemple le plutonium-238. Ils produisent des effets sur la santé semblables à ceux du plutonium-239, par unité de radioactivité. Mais la radioactivité par unité de poids varie suivant l'isotope. Par exemple, le plutonium-238 est 270 fois plus radioactif que le plutonium-239 par unité de poids.

### Les données expérimentales

Les effets du plutonium sur la santé ont été étudiés surtout sur la base d'expérimentations effectuées sur des animaux de laboratoire. Quelques analyses ont été aussi faites sur des cohortes de travailleurs et de personnes du public exposées à une contamination par le plutonium. On a également procédé aux Etats-Unis à des injections de plutonium à des êtres humains. Entre 1945 et 1947, on a injecté 18 personnes avec du plutonium pour obtenir des données sur le métabolisme du plutonium. Ces expérimentations ont été faites sans le consentement de ces personnes et ont fait l'objet de critiques considérables depuis que leur existence a été officiellement dévoilée en 1993.

Des études sur le chien beagle avaient montré que l'inhalation d'une petite quantité de plutonium sous forme d'oxyde insoluble avait une très haute probabilité d'induire un cancer du poumon. En extrapolant ces données à l'homme, le chiffre pour une charge fatale de plutonium au poumon est d'environ 27 microgrammes. Bien sûr, une telle extrapolation à partir des animaux présente quelques incertitudes. Cependant il est raisonnable de conclure que plusieurs dizaines de microgrammes de plutonium-239 dans les poumons augmenteraient considérablement les risques de cancer du poumon. De plus grandes quantités de plutonium produiraient aussi des problèmes de santé à court terme.

Les effets quantitatifs précis de quantités de plutonium considérablement plus petites ne sont pas encore bien connues. Plusieurs facteurs interviennent, tels que:

- la difficulté de mesurer le plutonium dans l'organisme;
- les incertitudes sur les taux d'excrétion et le métabolisme dues aux grandes variations d'un individu à un

autre (si bien que la même charge de plutonium produirait des doses considérablement différentes);

- la consommation de cigarettes;
- des incertitudes dans les données (comme, par exemple, le moment où l'ingestion ou l'inhalation s'est produite);
- des contacts différents et largement inconnus avec d'autres substances cancérigènes (aussi bien radioactives que non radioactives) durant les longues périodes pendant lesquelles ces études ont été menées;
- l'incapacité à étudier et suivre, dans la mesure du possible, la santé des employés qui ont travaillé avec du plutonium dans l'industrie des armes nucléaires.

Une des rares tentatives de suivi, pour analyser les effets de l'exposition de sujets à des doses de quelques microgrammes de plutonium, est une étude à long terme sur 26 "hommes de race blanche" du Manhattan Project qui furent exposés à Los Alamos en 1944 et 1945 sur le lieu de fabrication des premières armes atomiques. Ces sujets ont été suivis pendant de nombreuses années, les bilans de leur état de santé ont été publiés, le plus récent en 1991.<sup>2</sup>

Les quantités de plutonium présentes dans les organismes de ces sujets ont été estimées à "110 Bq (3 nCi) au minimum et 6960 Bq (188 nCi) au maximum."<sup>3</sup> Ces quantités correspondent à des poids allant de 0,043 microgrammes à 3 microgrammes. Cependant les faiblesses de cette étude laissent beaucoup d'incertitudes quant à la quantité et la solubilité du plutonium effectivement incorporé au moment de l'exposition.<sup>4</sup>

Sept de ces sujets étaient décédés en 1991. Un cancer des os (sarcome osseux) était à l'origine de l'un des décès.<sup>5</sup> Le cancer des os est rare chez les humains. Sa fréquence attendue dans un groupe de 26 personnes sur une durée de 40 ans est seulement de 1 sur cent. Ainsi son existence chez une personne exposée au plutonium (qui d'ailleurs a reçu une dose inférieure au seuil admis par les règles de radioprotection) est significative.<sup>6</sup>

Il y a des données sur l'exposition au plutonium dans d'autres pays, notamment en Russie. Celles ci sont encore en cours d'évaluation.

1 L'énergie déposée dans un milieu (par unité de masse) est mesurée en grays ou rads (1 gray = 100 rads), tandis que les dégâts biologiques sont mesurés en sieverts ou rems (1 sievert = 100 rems).

2 G.L. Voelz and J.N.P. Lawrence, "A 42 year medical follow up of Mahattan Project plutonium workers." *Health Physics*, Vol.37, 1991, pp. 445-485.

3 *Ibid*, p.186.

4 Les aspects de cette étude sont discutés en détails par Gofman 1981, pp.510-520 (basés sur une étude sur la situation des travailleurs du Manhattan Project publiée dans Voelz 1979). J.W. Gofman, *Radiation on Human Health* (San Francisco, Sierra Club Books, 1991), p. 516.

5 Trois de ces décès étaient dus au cancer du poumon. Il est difficile de tirer des conclusions d'un si petit nombre de cas puisque ces trois personnes fumaient.

6 Voelz, p.189.

# Le MOX en France et en Belgique

JEAN-PIERRE MORICHAUD

Les premiers essais industriels d'emploi du MOX dans un réacteur en Europe datent de 1963 dans le réacteur BR3 de Mol en Belgique, puis de 1974 dans Chooz A (aujourd'hui arrêté), à la frontière franco-belge. Ils furent le fruit d'une collaboration franco-belge, qui se poursuit encore aujourd'hui. Belgonucléaire et COGEMA ont commencé à produire conjointement du MOX dans deux petites usines, une à Dessel en Belgique (mise en service en 1973), et l'autre à Cadarache en France (mise en service en 1970). Les capacités annuelles de ces deux usines sont respectivement de 35 et 15 tonnes de MOX. Également, dans le cadre de la collaboration franco-belge 4 réacteurs belges à eau pressurisée de Tihange et Doël et 28 des premiers réacteurs français de 900 Mw, mis en service entre 1980 et 1984, ont été conçus pour recevoir du MOX. Ils sont dotés de quatre traversées de couvercle de cuve inutilisées, qui recevront les grappes de contrôle supplémentaires jugées nécessaires pour le MOX. Curieusement, les 22 réacteurs de 1300 Mw suivants ne sont pas adaptables au MOX. Probablement parce qu'après une vague initiale de développement du MOX pour les REP, le changement de priorité pour l'utilisation du plutonium dans la filière des surgénérateurs, l'a relégué au second rang des combustibles au plutonium.

Il faudra attendre 1984, après qu'il soit devenu évident que les espoirs du départ sur la filière des surgénérateurs n'aboutiraient pas, pour voir la Belgonucléaire et la COGEMA se regrouper pour commercialiser le MOX dans les REP. Ainsi, comme conséquence de ces nouveaux efforts, en 1987, le premier chargement de MOX en France a eu lieu à Saint-Laurent-les-Eaux (Pays de Loire). Sur les 52 assemblages renouvelés ( $\frac{1}{3}$  du réacteur), 16 sont en MOX. Il en sera ainsi de suite pour 9 autres réacteurs jusqu'à ce jour, pour parvenir à un taux de remplissage en MOX de 30%. C'est celui accepté par les autorités de sûreté nucléaire françaises pour un MOX ne contenant pas plus de 5,3% de plutonium. En Belgique, après un débat au Parlement en décembre 1993, deux réacteurs peuvent recevoir du MOX avec un taux de remplissage de 20% seulement, mais avec du MOX à 7,7% de plutonium. Cette seconde vague de développement du MOX pour les REP a eu comme conséquence la construction d'une nouvelle usine en France, à

L'utilisation du MOX dans les REO est la dernière chance pour les partisans du combustible au plutonium.

Marcoule surnommée Melox, avec une capacité annuelle de 115 tonnes. Une autorisation a été accordée en 1990 pour la construction de l'usine, et elle a été mise en service en 1995. Fin 1996, elle aurait livré 96 assemblages de MOX à EDF.

Seulement 16 des 28 réacteurs français de 900 Mw ont été autorisés à recevoir du MOX lors de leur construction. De sorte qu'actuellement se déroulent des enquêtes auprès de la population pour obtenir un accord pour « moxer » 4 autres réacteurs à Chinon, sur la Loire. Cette démarche est en incohérence avec la décision gouvernementale de faire tirer par ses experts, pour juin 1997, un « bilan écologique et économique de la filière MOX ». Aussi le Forum Plutonium a-t-il demandé le report de l'enquête publique de Chinon à l'automne 1997.

Les conditions de sûreté et de sécurité de cette filière nucléaire et son intérêt économique sont contestés par beaucoup d'experts en France, et depuis longtemps. En novembre 1990, au moment de la décision de construire Melox, Jean-Paul Schapira, physicien nucléaire reconnu, contestait déjà l'intérêt du MOX dans la revue « La Recherche ». <sup>1</sup> Aujourd'hui, dans le n° 155 de la Gazette Nucléaire, Monique Séné, du Groupement des Scientifiques pour l'Information sur l'Énergie Nucléaire, constate que les objections soulevées par J.P. Schapira se sont vérifiées sur les 550 assemblages de MOX utilisés à ce jour par Électricité de France (EDF). <sup>2</sup>

Schapira et Séné mettent en lumière un certain nombre de problèmes posés par le MOX. Comparé au combustible classique à l'uranium (UOX) qu'il remplace, le MOX pose des problèmes de sûreté supplémentaires (conduite plus fine des réacteurs, métallurgie moins aisée, relâchement de gaz de fission, corrosion des gaines du combustible). Au vu des signes de vétusté qui apparaissent aujourd'hui sur les 900 Mw français, ces complications d'utilisation du combustible ne semblent pas du tout souhaitables.

Les problèmes de sécurité liés à cette activité tournent autour des transports de matières nucléaires aptes à la fabrication de l'arme atomique ou de tout autre engin à usage terroriste. En France, le plutonium et le MOX circulent par la route, sous escorte policière, le jour seulement, selon des trajets tenus secrets. <sup>3</sup> Le plutonium étant produit à la Hague, dans le Cotentin, et les usines de MOX étant en Belgique et dans le sud-est de la France, les transports s'en trouvent multipliés. De plus, la dispersion du plutonium ainsi induite aux quatre coins de la France, comme de l'Europe, constitue une pollution radiotoxique de l'écosystème qui pourraient durer des millénaires. <sup>4</sup> Finalement le MOX est

LIRE LA SUITE, PAGE 8

# Situation et perspectives pour la production du combustible MOX en Russie

ANATOLI DIAKOV

Les recherches sur l'utilisation du plutonium comme combustible pour les réacteurs nucléaires ont débuté en Russie dès le début des années 50, cependant les recherches systématiques n'ont commencé qu'au début des années 70. La priorité avait alors été donnée à l'utilisation du plutonium dans les surgénérateurs.

Les premiers assemblages expérimentaux de combustible MOX destinés à l'alimentation des surgénérateurs de recherche BR-5 (BR-10) et BOR-60 ont été fabriqués dans les années 70. Des assemblages expérimentaux de MOX ont également été testés dans les surgénérateurs prototypes BN-350 et BN-600, qui d'ordinaire utilisent du combustible d'uranium hautement enrichi. Le tableau 1 donne des chiffres sur les quantités de MOX fabriquées et chargées dans les réacteurs russes, pilotes et commerciaux. En tout, plus de 2000 crayons de combustible ont été fabriqués et testés dans les réacteurs BN-350 et BN-600. Ils avaient une teneur en matière fissile de 9 à 11 pour cent.

Les recherches russes sur l'utilisation du plutonium dans les REO ont commencé seulement récemment, dans le cadre du programme de l'évacuation du plutonium et du fait du manque de soutien financier de la part de l'État pour les surgénérateurs. Jusqu'ici aucun essai n'a été mené dans les réacteurs commerciaux VVER-1000, bien que les recherches soient en cours sur l'utilisation du MOX dans ces réacteurs. Le but principal de ces recherches est d'utiliser du MOX dans les nouveaux réacteurs VVER-640 (ou NP-500). Une

installation réservée à la démonstration a été mise en service pour générer des données à partir des essais et mettre sur pied un programme d'utilisation du MOX. On propose aussi que les recherches sur l'arrangement des crayons de combustible dans les assemblages de combustibles uranium-plutonium pour les réacteurs VVER se fassent dans cette usine. Un programme de chargement d'un réacteur déjà en fonctionnement avec 100% de MOX est aussi en cours d'étude.

## Les usines de fabrication de MOX en fonctionnement

Deux usines pilotes pour la fabrication du MOX existent en Russie. Ce sont les usines Paket et Granat toutes les deux situées à Maïak (Tchelyabinsk-65). Ces deux usines sont conçues pour travailler avec du plutonium de qualité militaire, et pour produire du MOX pour les surgénérateurs. Leur capacité n'est pas importante—la production annuelle maximale de plutonium à l'usine Granat est de 50 kg (équivalent à une tonne de MOX) avec un maximum de 300 grammes de plutonium par chargement. La capacité annuelle de l'usine Paket est de 200 kg de plutonium, ou 30–36 assemblées de combustible correspondant à une tonne de MOX par an, avec une teneur en plutonium de 20%.

L'usine Paket a été mise en service en 1980. A cette usine, les poudres d'oxyde d'uranium et de plutonium qui ont été produites séparément sont mécaniquement mélangées. Ensuite un liant est ajouté au mélange, et tout est à nouveau mélangé, granulé et compressé en

LIRE LA SUITE. PAGE 7

**TABLEAU 1. LA CHRONOLOGIE DE LA FABRICATION DU MOX EN RUSSIE**

Méthode de fabrication	Usine pilote	Réacteur	Nombre d'assemblages (poids de Pu)
Co-broyage (pastilles)	Dimitrovgrad (1970)	BOR-60 (1973)	quelques dizaines de kg
Enrobage pyrolytique	Dimitrovgrad (1970)	BOR-60 (1975)	quelques dizaines de kg
Co-précipitation par les carbonates	PO Mayak (1980) Dimitrovgrad (1970)	BOR-60 (1980)	10 kg
Chimie du plasma	Moscow (1980)	BOR-60 (1981)	2 crayons de combustible (environ 1 kg)
Co-broyage (pastilles)	PO Maïak (1980)	BN-350 (1980)	10 assemblages de combustible (environ 80 kg)
Co-précipitation par l'ammoniaque	PO Maïak (1980)	BN-350 (1992)	1 assemblage de combustible (environ 10 kg)
Co-précipitation par l'ammoniaque	PO Maïak (1980)	BN-600 (1992)	8 assemblages de combustible (environ 80 kg)
Co-broyage (pastilles)	PO Maïak (1980)	BN-600 (1990)	12 assemblages de combustible (environ 100 kg)

pastilles de combustible. Après cela les pastilles sont séchées et frittées. Finalement, les pastilles sont testées et placées dans des colonnes, les colonnes sont placées dans des gaines, et les barres sont soudées et passent un contrôle. Après décontamination, les barres sont envoyées à l'usine Elektrostal, où sont fabriqués les assemblages de combustible. Les spécialistes russes pensent que l'usine Paket peut aussi être utilisée pour fabriquer des barres de combustible expérimentales avec du plutonium provenant des armes et qui pourraient être utilisées dans des réacteurs thermiques de recherche.

L'usine de Granat, qui a été mise en service au début de 1988, est réservée à la fabrication de granules de MOX pour les surgénérateurs, avec du plutonium séparé du combustible irradié des surgénérateurs ou du plutonium militaire. La teneur en plutonium de ce MOX va jusqu'à 25%. L'usine Granat est à présent à l'arrêt pour raisons de sûreté.

Cette installation est équipée de 14 boîtes à gants. La méthode de fabrication du MOX à Granat est basée sur la co-précipitation de l'uranium et du plutonium par des solutions d'acide nitrique. Les granules qui en résultent sont très secs et ne produisent presque pas de poussière quand ils sont manipulés. Ces granules sont ensuite dirigés vers l'usine de Paket pour être fabriqués en pastilles et barres.


La construction du "Complex 300", conçu pour préparer des barres de combustible pour les surgénérateurs a débuté en 1984. La capacité annuelle de l'usine est de 30 tonnes de MOX. La construction a été stoppée en 1989 à cause de retards dans la construction des réacteurs BN-800. L'usine comprend une série de salles conçues pour recevoir une chaîne de production de fabrication des barres de combustible avec des granules de MOX. L'équipement de production est complet, mais il n'a pas encore été installé. Les techniques de fabrication du MOX au Complex 300 sont les mêmes que celles utilisées à l'usine Paket. Cependant, parce que le Complex 300 (contrairement à Paket), est aussi conçu pour travailler avec du plutonium de qualité réacteur, il est équipé de boîtes et manipulateurs blindés.

L'arrêt de la construction a eu comme conséquence la détérioration du bâtiment et de l'équipement. D'une façon générale, les experts russes voient la reprise de la construction de l'usine d'un œil sceptique, puisque la conception de l'installation est moins sophistiquée que celle des usines de fabrication du MOX à l'Ouest.

Il est peu probable que l'usine du Complex 300 soit utilisée pour fabriquer du MOX pour les réacteurs thermiques, puisqu'elle est conçue pour fabriquer des pastilles de combustible pour les surgénérateurs. Ces dernières diffèrent sur un certain nombre de points des pastilles pour réacteurs thermiques. De plus l'équipe-

Rendez visite à la page Web de IEER <http://www.ieer.org> pour lire maintenant des informations en français! Vous pouvez trouver le premier numéro d'Énergie et Sécurité. Nous y ajouterons des informations nouvelles en français dans les mois qui viennent.

ment de la chaîne n'est pas conçu pour la manipulation du plutonium militaire.

À présent, la Russie travaille en proche collaboration avec l'Allemagne et la France pour développer une usine pilote de fabrication de MOX qui tirera profit de l'expérience et de la technologie de l'Ouest. Deux plans de construction sont retenus. Le premier est celui de l'installation "Tomox 1300", spécifié dans le programme de collaboration Franco-Russe, AIDA-MOX pour convertir annuellement 1 300 kg de plutonium militaire en assemblages MOX. La capacité annuelle totale de l'usine serait de 30 tonnes de MOX. Une étude conjointe, germano-russe, propose une usine pilote d'une capacité annuelle d'une tonne de plutonium de qualité militaire correspondant à 10 tonnes de combustible pour les REO d'une teneur maximale de 15% de plutonium. Ces études préliminaires sont complétées et, à l'heure actuelle, les trois partenaires sont en train de négocier l'emplacement et le financement de l'usine. Le coût est estimé à \$ 130 millions. Des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si cette usine pilote pourrait aussi être utilisée pour la fabrication du MOX pour les surgénérateurs avec une teneur en plutonium pouvant atteindre 45%. 

*Anatoli Diakov est professeur de physique à l'Institut de physique et de technologie de Moscou. En 1990 il a établi, en collaboration avec le professeur Frank von Hippel le Centre d'étude sur la limitation des armements, l'énergie et l'environnement, à l'Institut de physique et de technologie de Moscou. La politique russe d'évacuation du plutonium de qualité militaire, la transparence et l'irréversibilité de la réduction des armes nucléaires figurent parmi les activités du professeur Diakov.*

intimement lié à la politique de retraitement du combustible usé, qui est probablement l'activité écologiquement la plus dangereuse de l'industrie nucléaire. Des études récentes près de la Hague et Sellafield ont mis en évidence les nombreux problèmes écologiques et de santé résultant du retraitement.

En même temps que le plutonium s'accumule à La Hague (36 tonnes inventoriées au 31 décembre 95), le prix du minerai d'uranium baisse et l'uranium issu du retraitement s'accumule aussi. Au 1er juin 1995, La Hague en avait produit 7 500 tonnes, de quoi fabriquer 15 000 assemblages. Vu la disponibilité de ces grandes quantités d'uranium à prix bas, le MOX n'est pas compétitif avec le combustible à l'uranium. La fabrication du MOX est considérablement plus chère que celle du combustible à l'uranium, même si le plutonium est considéré comme gratuit. Si les coûts du retraitement sont pris en compte, il est clair que le MOX n'est pas compétitif.

L'exploitant constate également de nombreuses contraintes techniques pour la fabrication et la gestion du combustible MOX, qui ne peuvent qu'aggraver les coûts.

- présence d'émetteurs alpha très contaminants et d'américium 241, émetteur gamma très irradiant;
- délai limité à 2 ou 3 ans du stockage du plutonium extrait pour faire du MOX et du stockage de celui-ci avant son utilisation (voir p. 10);
- l'accroissement du temps de séjour en réacteur, recherché par l'exploitant, oblige à un enrichissement plus fort des combustibles : 4,2 % pour l'UOX, mais 8 % pour le MOX. Or le MOX autorisé actuellement en France ne contient que 5,3 % de plutonium. Il produit 30 Gwj/ tonne alors que l'UOX en produit 47. EDF a ainsi demandé, encore sans résultat, l'autorisation de porter le taux de plutonium à 7 %;
- les essais de retraitement de MOX ont fourni un plutonium moins performant et un taux de transuraniens plus élevé (et donc, un niveau plus élevé de radioactivité) que dans l'UOX retraité. En août 1996, EDF déclare vouloir « entreposer » le MOX usé, en attente de jours meilleurs probablement. Donc, jusqu'à maintenant il n'y pas de programme qui étudie l'avenir du MOX irradié.

Le MOX, regardé par certains comme un moyen de réduire le stock de plutonium, n'est donc pas sans inconvénient. Après l'échec de la filière des surgénérateurs, c'est pourtant le fer de lance de l'une des deux cultures d'entreprise qui se trouvent en compétition au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), puis à la COGEMA, depuis la création du Centre de Marcoule

en 1953, celle du plutonium. L'autre culture, celle de l'uranium enrichi s'est développée à Pierrelatte, située un peu en amont sur le Rhône, avec l'usine d'enrichissement Eurodif, conçue pour ne pas vieillir, grâce à une rénovation permanente des étages de diffusion gazeuse. Or, elle n'a jamais dépassé la moitié de sa capacité de production initiale. Cependant avec l'accumulation de l'uranium issu du retraitement, les partisans de la filière UOX relèvent la tête, et le ministre de l'Industrie a inauguré le 26 février 1997, au centre d'étude de Saclay, près de Paris, la première unité pilote française d'enrichissement par laser de l'uranium en phase vapeur.

Si un médiocre bilan économique de la filière MOX venait s'ajouter à son bilan écologique manifestement désastreux, le plutonium pourrait, en France, devenir un déchet. Il y a donc quelque espoir pour que les générations futures aient moins de plutonium à gérer qu'actuellement prévu dans les contrats de retraitement de la COGEMA.

*Jean-Pierre Morichaud, ingénieur physico-chimiste en retraite, a commencé sa carrière à Saclay en 1957. Il a présidé le collectif d'opposition à l'usine Melox, de 1992 à 1994. Il est actuellement coordinateur du Forum Plutonium, collectif d'associations de France, de Belgique et de Suisse.*

- 1 J.P. Schapira, "Une nouvelle stratégie pour le plutonium," *La Recherche*, No. 226, Novembre 1990.
- 2 M. Sené, "Dossier MOX", *La Gazette Nucléaire*, No. 155/156, Janvier 1997
- 3 M. Pavageau, J.Hazeman, M. Schneider, *Les transports de l'industrie du plutonium en France*, WISE-Paris, 1995.
- 4 *Plutonium, Deadly Gold of the Nuclear Age*, IPPNW/IEER, 1992, la version française est dans le Vol. 8, No. 3, 1993 de *Médecine et Guerre Nucléaire*.

L'équipe d'IEER est heureuse d'accueillir Robert Brooks en qualité d'assistant de coordination pour le projet de diffusion globale.

Avant de rejoindre l'IEER, Robert a travaillé pour la Campagne Toxiques de Greenpeace (Environmental Justice), et pour des projets pour la protection de l'environnement le long de la frontière, entre les États-Unis et le Mexique, dans l'ouest du Texas. Il joue aussi du jazz.



# La transmutation n'est pas une alternative à l'enfouissement

ARJUN MAKHIJANI

En 1996, le Conseil national de recherche de l'Académie nationale des sciences américaine a publié un rapport très détaillé sur la gestion des déchets nucléaires sous le titre: *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*.<sup>1</sup> L'objet de ce rapport était d'examiner les techniques, actuelles aussi bien que nouvelles, pour séparer les radioéléments de longue durée de vie, comme le plutonium-239 et l'iode-129, du combustible irradié et du retraitement des déchets à très haute activité et pour les transmuter dans divers réacteurs nucléaires en radioéléments de durée de vie plus courte.

Le combustible irradié provenant du réacteur le plus répandu (le réacteur à eau ordinaire) contient environ 94 % d'uranium, 5 % de produits de fission très radioactifs (quelques uns d'entre eux ont une très longue durée de vie), presque un pour cent de plutonium et autres transuraniens comme le neptunium et l'américium.

Les produits de fission à vie longue comme l'iode-129 et les éléments lourds à vie longue comme le plutonium-239 peuvent être convertis en radioéléments de courte durée de vie quand ils sont bombardés avec une variété de neutrons dans des réacteurs nucléaires. Cette méthode est la transmutation. (Il est à noter que la transmutation par la fission est responsable de la production d'énergie nucléaire, en premier lieu.) Les partisans de la transmutation maintiennent qu'elle pourrait éviter la construction d'un dépôt en couche géologique profonde.

Pour pouvoir utiliser des réacteurs nucléaires (soit déjà en service, soit de type nouveau) pour transmuter des radioéléments de vie longue en radioéléments de vie courte, il est d'abord nécessaire de séparer les radioéléments de vie longue du combustible irradié. Donc, la réussite d'une gestion des déchets de ce genre, nécessite des technologies de séparation et de transmutation. Le rapport examine les aspects techniques et économiques de ces technologies.

L'étude du Conseil national de recherche a été motivée, en partie, par la nécessité d'une évaluation indépendante des affirmations avancées par le Départe-

Des radioéléments de vie longue resteraient en quantité suffisante pour nécessiter la construction d'un dépôt géologique, quelques soient les technologies actuelles utilisées.

ment de l'énergie américain et de ses sous-traitants, General Electric et Argonne National Laboratory, qui déclarent que le réacteur à métal liquide de type avancé et la technologie de retraitement qui l'accompagne, appelée le procédé électrométallurgique, pourraient dramatiquement réduire la quantité de déchets radioactifs de vie longue qui ont besoin d'être gérés et évacués. Cette étude examine l'éventualité d'une combinaison de technologies de séparation qui pourrait convertir des quantités suffisantes (pratiquement la totalité?) de radioéléments de longue durée en radioéléments de courte durée qui pourraient être entreposés jusqu'à la diminution de leur radioactivité à des niveaux très faibles. Cette étude a conclu que les technologies actuelles ne pourraient pas parvenir à cet objectif, parce que des radioéléments de vie longue resteraient, quelles que soient les circonstances, en quantité suffisante pour nécessiter la construction d'un dépôt géologique. De plus, cela prendra des centaines d'années pour réduire la radioactivité de ces transuraniens transmutés d'un facteur dix, et des milliers d'années pour la réduire d'un facteur cent.

Les technologies toujours en cours de développement, comme par exemple le réacteur sous-critique relié à une source d'accélération de neutrons, proposées par le Los Alamos National Laboratory,<sup>2</sup> prendraient longtemps pour leur réalisation et il n'est même pas sûr qu'elles puissent être commercialisées. Même dans le cas contraire, il est "improbable" que le degré de séparation très poussé nécessaire pour obtenir la transmutation de pratiquement tous les radioéléments de vie longue puisse être obtenu. L'étude fournit des estimations basées sur l'expérience européenne sur ce que coûterait la construction et l'exploitation d'une nouvelle usine de retraitement aux États-Unis. L'étude signale que les coûts de retraitement pour les usines déjà en service (THORP en Angleterre et La Hague en France) seraient de \$600 à \$1400 du kilo de métal lourd.

Ces frais se rapportent au retraitement du combustible irradié d'un premier chargement d'un combustible à l'uranium neuf. Une alimentation des réacteurs en combustible recyclé d'uranium ou de plutonium entraînerait des coûts de retraitement plus élevés. Les procédés qu'il faudrait ajouter pour réduire au minimum les pertes en cours d'exploitation de matières radioactives lors du retraitement créeraient une dépense supplémentaire. Finalement, l'étude rejette l'affirmation de Argonne National Laboratory selon laquelle les coûts de la méthode de retraitement électrométallur-

LIRE LA SUITE, PAGE 20

# La transformation du plutonium avec le temps

**E**n général, un échantillon de plutonium n'est pas constitué que de plutonium-239 pur, mais d'un mélange d'isotopes. Il y a quinze isotopes de plutonium, dont les nombres de masse vont de 232 à 246. Ils sont tous radioactifs, c'est-à-dire que leur noyau se désintègre et que durant ce processus de nouveaux éléments sont formés. Tous les produits de la désintégration des isotopes du plutonium sont radioactifs. Donc, chaque isotope de plutonium forme une chaîne de désintégration. Une chaîne de désintégration simplifiée du plutonium-239 est illustrée au tableau 3.

Les isotopes ordinairement trouvés dans le plutonium fabriqué dans les réacteurs nucléaires vont du plutonium-238 au plutonium-242. La quantité des isotopes, autres que le plutonium-239, produits dans les réacteurs militaires ou civils dépend du type de combustible utilisé, du type de réacteur, et du temps d'irradiation.

Le tableau 1 montre les deux mélanges de plutonium les plus courants. Le premier est le plutonium de qualité militaire qui contient 93 pour-cent ou plus de plutonium-239. L'autre est une composition typique de plutonium de qualité réacteur généré dans les réacteurs à eau ordinaire. Il est à remarquer que le plutonium de qualité réacteur généré dans les réacteurs à eau ordinaire contient habituellement plus de 20 % de plutonium-240, et plus de 10% de plutonium-241. Le plutonium produit dans les autres

réacteurs comme par exemple les réacteurs modérés au graphite (dont certains fonctionnent en Angleterre, en Russie et ailleurs) ou dans les réacteurs à eau lourde utilisés au Canada et ailleurs, a une composition intermédiaire à celles présentées dans le tableau. Le tableau 1 donne aussi la demi-vie et l'activité spécifique des isotopes les plus courants. La demi-vie se rapporte au temps nécessaire pour que la moitié des atomes d'un échantillon se soient désintégrés. L'activité spécifique (qui

**"L**a Science pour les masses critiques" apparaîtra régulièrement dans *Energie et Sécurité*. Elle fournira aux lecteurs des éléments de référence technique pour les questions de politique discutées dans chaque numéro, ainsi que l'occasion de mesurer leurs connaissances sur ces points techniques. Remarquez qu'il y a plusieurs chiffres qui manquent au tableau 2. Vous aidant des informations données dans l'article qui l'accompagnent, remplissez les colonnes vides. Les réponses seront données dans le prochain numéro.

est inversement proportionnelle à la demi-vie) indique la radioactivité d'un certain poids de matériau. Le plutonium de qualité militaire et celui de qualité réacteur contiennent tous les deux du plutonium-241. Le plutonium-241 se transforme en américium-241 en émettant une particule bêta. Du fait que l'américium-241 a une demi-vie beaucoup plus longue (432 ans) que le plutonium-241 (14,4 ans), il s'accumule au fur et à mesure que le plutonium-241 se désintègre. Le rayonnement gamma de la désintégration de l'américium-241, qui est beaucoup plus fort que celui du plutonium-239, s'accroît aussi avec le vieillissement de l'échantillon de plutonium. Donc, plus il y a de

LIRE LA SUITE, PAGE 11

TABLEAU 1

Plutonium isotope	Demi-vie, années	Activité spécifique, curies par gramme	Quantité dans le pu de qualité militaire, pourcentage	Quantité dans le pu de qualité réacteur, pourcentage <sup>1</sup>
plutonium-238	87,74	17,3	—	1,3
plutonium-239	24 110	0,063	93,0	56,6
plutonium-240	6 537	0,23	6,5	23,2
plutonium-241	14,4	104	0,5	13,9
plutonium-242	379 000	0,004	—	4,9

<sup>1</sup> Typique pour les réacteurs à eau pressurisé, le genre de réacteurs le plus courant en exploitation.

TABLEAU 2

Isotope	composition initiale	après 2 ans	après 5 ans	après 14,4 ans	après 28,8 ans
plutonium-241	1	0,91	?	0,5	?
américium-241	0	0,09	?	0,5	?

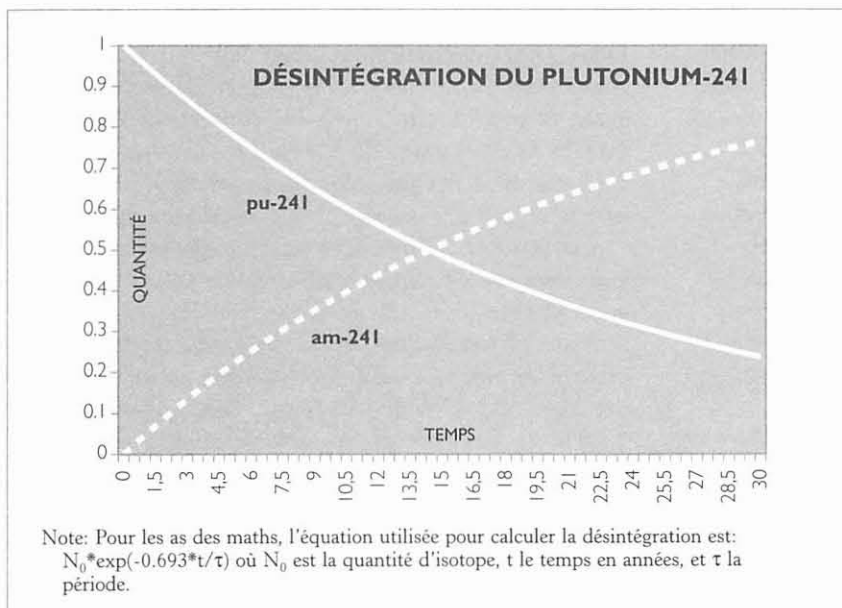
SUITE DE LA PAGE 10

plutonium-241 et plus l'échantillon est vieux, plus il y a une accentuation du rayonnement gamma provenant de l'accumulation de l'américium-241.

Puisque le plutonium de qualité réacteur contient des quantités substantielles de plutonium-241, plus l'échantillon est vieux, plus grande est la dose de radiation pour les travailleurs qui le manipulent. Quand les pays qui utilisent le plutonium séparé du combustible irradié des réacteurs à eau ordinaire pour fabriquer du combustible à oxydes mixtes (combustible MOX), les échantillons de plutonium plus vieux donnent des doses de radiation plus importantes aux ouvriers des usines de MOX. Les vieilles usines de MOX sont équipées pour manipuler du plutonium de qualité réacteur qui date de moins de 2 ans après le retraitement (le retraitement sépare les isotopes d'américium présents dans le combustible irradié). Les usines MOX plus récentes peuvent manipuler du plutonium de qualité réacteur âgé d'environ 3 ans. Ainsi des pays comme le Japon et la Russie qui n'utilisent pas de

plutonium de qualité réacteur mais qui l'ont séparé et accumulé pendant de nombreuses années ont gaspillé beaucoup d'argent puisque le plutonium le plus vieux devra probablement être de nouveau retraité pour éliminer l'américium-241. Ainsi, il serait certainement financièrement plus prudent, même pour les partisans du MOX d'arrêter le retraitement jusqu'au jour où le plutonium est prêt à être fabriqué en combustible.

Le tableau 2 et le graphe montrent comment l'américium-241 s'accumulerait dans un échantillon de 200 grammes de plutonium de qualité réacteur dans lequel se trouve 1 gramme de plutonium-241 au moment du retraitement. Il y a deux colonnes vides à remplir par le lecteur comme exercice pour affiner sa compétence. Il est à noter que la demi-vie du plutonium-241 est de 14,4 années et qu'à chaque demi-vie, la moitié du plutonium-241 se transforme en américium-241. Pour plus de simplicité nous avons négligé la désintégration de l'américium-241 puisque 28,8 années sont peu comparées à sa demi-vie de 432 ans.



**TABLEAU 3**  
LA BRANCHE PRINCIPALE  
DE LA CHAÎNE DE  
DÉSINTÉGRATION DU  
PLUTONIUM-239

<b>Plutonium-239</b> (demi-vie: 24 110 ans) ↓ désintégration alpha
<b>Uranium-235</b> (demi-vie: 704 000 000 ans) ↓ désintégration alpha
<b>Thorium-231</b> (demi-vie: 25,2 heures) ↓ désintégration bêta
<b>Protactinium-231</b> (demi-vie: 32 700 ans) ↓ désintégration alpha
<b>Actinium-227</b> (demi-vie: 21,8 ans) ↓ désintégration bêta
<b>Thorium-227</b> (demi-vie: 18,72 jours) ↓ désintégration alpha
<b>Radium-223</b> (demi-vie: 11,43 jours) ↓ désintégration alpha
<b>Radon-219</b> (demi-vie: 3,96 secondes) ↓ désintégration alpha
<b>Polonium-215</b> (demi-vie: 1,78 millisecondes) ↓ désintégration alpha
<b>Plomb-211</b> (demi-vie: 36,1 minutes) ↓ désintégration bêta
<b>Bismuth-211</b> (demi-vie: 2,15 minutes) ↓ désintégration alpha
<b>Thallium-207</b> (demi-vie: 4,77 minutes) ↓ désintégration bêta
<b>Plomb-207</b> (demi-vie: stable)

Les valeurs pour les demi-vies proviennent du *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 1988.

qui existent encore), que le plutonium est un handicap en terme d'économie et de sécurité. Malgré leurs différences d'opinions, les États-Unis et la Russie collaborent depuis 1994 sur des méthodes d'évacuation de ce surplus de plutonium militaire. L'étude conjointe russo-américaine sur l'élimination du plutonium (Joint United States/Russian Plutonium Disposition Study), préparée par des équipes de scientifiques et de représentants de ces deux pays et publiée en septembre 1996, est un des résultats de cet effort commun.

Cette étude présente un certain nombre d'options, et reflète les accords et désaccords entre les gouvernements de ces deux pays. Les deux gouvernements sont d'accord sur le fait qu'il est très important de transformer, dans un délai raisonnable, le surplus de plutonium en une forme inutilisable pour les armes nucléaires. Dans ce rapport, les États-Unis et la Russie présentent quatre options communes. La Russie en présente, en plus, deux qui lui sont propres. Les quatre options présentées en commun sont:

1. l'utilisation sous forme de MOX dans des réacteurs à eau ordinaire ou lourde;
2. l'utilisation sous forme de MOX dans les surgénérateurs;
3. l'immobilisation dans du verre ou de la céramique;
4. l'évacuation directe du plutonium en couche géologique.

Les deux options présentées par la Russie, seule, sont: (i) l'utilisation dans les réacteurs à haute température refroidis par gaz, et (ii) l'utilisation dans des systèmes basés sur des accélérateurs.

Les deux premières options consistent à utiliser le plutonium dans le combustible des réacteurs. Le plutonium serait converti en oxyde, mélangé avec de l'oxyde d'uranium, et fabriqué en pastilles de combustible céramique (en abrégé combustible MOX). L'isotope d'uranium utilisé dans le MOX est l'uranium-238, qui n'est pas fissile. Les pastilles de MOX seraient ensuite placées dans des barres de combustibles et chargées dans les réacteurs comme substitut partiel ou complet du combustible à l'uranium actuellement utilisé. Ce dernier est enrichi en uranium-235 qui, lui, est fissile. Parmi les options à l'étude, le MOX (dans les réacteurs à eau ordinaire [REO] et les surgénérateurs) et l'immobilisation (le mélange du plutonium et avec du verre ou de la céramique) sont les deux technologies sérieusement considérées pour une mise en œuvre à court terme.

Cette étude conclut que les plus au point des technologies considérées sont celles qui mettent en œuvre "les options réacteur qui font appel à l'utilisation de réacteurs et des technologies pour la fabrication du

MOX ayant fait leurs preuves." Les technologies d'immobilisation sont placées en deuxième position. Ce jugement se base en grande partie sur l'expérience européenne d'utilisation du MOX dans les REO, et l'expérience russe du développement du MOX pour les surgénérateurs. Cependant, un certain nombre de différences entre le plutonium civil (utilisé en Europe) et le plutonium militaire rendent ce jugement plus incertain. De plus, les décennies d'expérience européenne de vitrification (la méthode la plus développée d'immobilisation) des déchets radioactifs de haute activité semble ne pas avoir été prise en compte dans cette comparaison des technologies.

### La fabrication du MOX<sup>2</sup>

Le MOX utilisant du plutonium de qualité militaire n'a jamais été fabriqué à échelle industrielle. Les usines de MOX en exploitation utilisent un oxyde de plutonium (appelé plutonium de qualité réacteur) provenant des usines qui retraitent du combustible usé des centrales nucléaires. Il y a cependant plusieurs importantes différences (voir p. 10). Les usines commerciales de retraitement utilisent un procédé qui a recours à une phase aqueuse (c'est-à-dire des acides et autres solvants) pour séparer le plutonium et l'uranium dans le combustible irradié des produits de fission, et l'un de l'autre. Le produit final est une poudre d'oxyde de plutonium qui peut être utilisée directement pour la production du MOX. La grosse partie du plutonium militaire, elle, est sous forme de métal dans des "cœurs" (pits). Ces "cœurs" contiennent aussi d'autres matériaux en petites quantités. De plus, aux États-Unis comme en Russie (et probablement dans d'autres états aussi dotés de l'arme nucléaire) le plutonium des armes est allié avec du gallium, jusqu'à un pour cent de celui-ci. Le gallium complique le procédé de fabrication du MOX et pour cette raison il doit être presque entièrement éliminé avant la fabrication du combustible. Donc, le plutonium militaire doit être purifié et converti en oxyde (pas nécessairement dans cet ordre) avant de pouvoir être utilisé. Par conséquent, la fabrication du MOX à partir de plutonium militaire fait appel à des étapes et des procédés qui ne sont pas nécessaires avec le plutonium provenant des centrales nucléaires.<sup>3</sup>

Les procédés utilisés à l'heure actuelle pour convertir le plutonium militaire en combustible d'alimentation adéquat pour les usines de fabrication de MOX utilisent une phase aqueuse semblable à celle du retraitement. Ces procédés génèrent des rejets liquides considérables (pour plus de détails sur le retraitement, voir E&S n° 2). Les procédés qui pourraient être utilisés pour fabriquer l'oxyde de plutonium et éliminer le gallium n'en sont encore qu'au stade du laboratoire. Il faudra encore quatre ou cinq ans avant qu'ils n'atteignent l'échelle industrielle nécessaire à l'élimination du

plutonium sous forme de MOX. Les U.S. ont fait part de leur intention d'utiliser le processus sec ARIES pour éliminer le gallium des cœurs, tandis que la Russie envisage surtout des méthodes de phase aqueuse et de sels fondus (elle y collabore avec la France).

Aux États-Unis, le MOX a été testé dans des REO dans les années 60 et 70, mais la fabrication de MOX ne s'est faite que dans de petites boîtes à gants. Si les U.S. décident de poursuivre l'option MOX, ils devront construire une nouvelle usine de fabrication du combustible ou compléter l'Installation pour l'examen des combustibles et matériaux à Hanford dans l'état de Washington, dont la construction a commencé dans les années 70. Cette installation était destinée à la fabrication de combustible pour les surgénérateurs.

La Russie a une longue histoire de recherche et de développement du MOX pour les surgénérateurs mais, apparemment, Minatom n'avait pas envisagé d'utiliser du MOX dans les REO jusqu'à ce que le programme américain d'élimination du plutonium ne l'incite à considérer cette possibilité. (Pour plus d'information sur la fabrication de MOX russe, voir page 6.)

L'étude commune énumère de nombreuses précautions de sûreté, nécessaires à la fabrication du MOX comparativement au combustible à l'uranium. Le MOX émet des rayonnements gamma plus forts et beaucoup plus de neutrons que le combustible à l'uranium. Par conséquent, une installation, pour l'entreposage du combustible neuf sur le site, réservée exclusivement pour les conteneurs MOX, et un nouvel équipement pour le transport de combustible neuf seront peut-être nécessaires. La poussière produite pendant la fabrication du MOX est également une source d'inquiétude pour la santé des ouvriers en raison des dangers de l'inhalation du plutonium (voir l'article, p. 3).

### Les options réacteur à l'étude

Le temps qu'il faudra pour convertir, dans les réacteurs, le plutonium en combustible irradié inutilisable pour les armes dépend de plusieurs facteurs:

- le nombre, la taille, et le type de réacteurs utilisés;
- la puissance moyenne du réacteur;
- le pourcentage de plutonium dans le MOX;
- le pourcentage du cœur chargé en MOX.

Il faut noter qu'on s'attend à ce que toutes les options utilisant des réacteurs prennent beaucoup plus de temps que certaines options de vitrification pour atteindre l'objectif: amener le surplus de plutonium à une forme inutilisable pour les armes. De plus, les estimations initiales sur le temps nécessaire sont probablement sous-estimées. Les options qui impliquent la construction de réacteurs prendront

certainement le plus de temps. Pour l'élimination du plutonium, la Russie envisage d'utiliser le MOX dans les surgénérateurs ainsi que dans les REO. Les États-Unis quant à eux, ont déclaré, en décembre 1996, qu'ils poursuivraient une stratégie sur deux fronts qui étudierait l'utilisation du MOX dans les REO et les options d'immobilisation qui ne nécessitent pas l'utilisation du plutonium comme combustible.<sup>4</sup> Bien que les États-Unis aient contribué à la section du rapport qui étudie l'utilisation du MOX dans les surgénérateurs, ils ne s'engageront pas dans cette voie.

Les sections suivantes examinent les principales options de l'utilisation des REO et des projets russes d'utilisation du MOX dans les surgénérateurs.

### Les réacteurs thermiques en service

Les États-Unis ont un grand nombre de réacteurs en service qui pourraient être chargés avec du MOX. Dix-huit compagnies d'électricité, offrant 38 réacteurs pour la consommation du MOX, ont manifesté leur intérêt au Département à l'énergie à un moment ou un autre. A l'heure actuelle toutes ces compagnies ne sont pas intéressées, mais la situation peut changer. Une procédure, en bonne et due forme, est en cours pour que les compagnies d'électricité développent des propositions et pour que la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) les autorisent à utiliser du MOX (si elle détermine que les procédures d'autorisation sont valables).

Les options russes d'utilisation des réacteurs thermiques pour l'évacuation du plutonium sont plus limitées. Pour des raisons de sûreté, les réacteurs modérés par graphite (RMBK) et les petits réacteurs à eau ordinaire (VVER-440) ont été exclus. Seul les plus grands REO, les VVER-1000, pourraient être chargés avec du MOX, mais avec un chargement limité à 30% du cœur (les deux tiers des crayons de combustible restant seraient du combustible à l'uranium faiblement enrichi). Cependant, un rapport de 1995 par l'Académie nationale des Sciences (NAS) note que même ces VVER-1000 "ne remplissent pas les normes de sécurité internationales" et pour cela doivent être mis à niveau avant d'utiliser du MOX.<sup>5</sup>

Une difficulté supplémentaire vient du fait que les sept VVER-1000 russes en service ne pourront pas consommer les 50 tonnes de surplus de plutonium dans la période de 20 à 40 ans déterminée par les comités mixtes. Pour pouvoir mettre en œuvre une option REO, il faudrait achever la construction de trois réacteurs VVER-1000, à Kalinin et Rostov. Il a aussi été suggéré de charger onze réacteurs VVER-1000 ukrainiens avec du MOX en même temps que les réacteurs russes. D'autres mesures possibles pour réduire le temps nécessaire à l'évacuation du plutonium, comme, par exemple, la prolongation de la période d'exploitation des réacteurs au-delà des 30 ans prévus, le chargement

de plus du tiers du cœur avec du MOX, l'augmentation de la teneur en plutonium dans le MOX (au-delà des 3,9% actuellement prévus) poseraient des risques supplémentaires de sûreté qui n'ont pas été pris en compte d'une manière adéquate.

Même avec un chargement limité à un tiers du cœur, des modifications sur les VVER-1000 seront certainement nécessaires avant de pouvoir les alimenter avec du combustible au plutonium. Le rapport conjoint fait mention de plusieurs mesures possibles, la plupart concernant le maintien du contrôle du réacteur (voir la page 16).

### Les réacteurs "évolutionnaires"

Les États-Unis et la Russie examinent des projets pour utiliser de nouveaux modèles de réacteurs qui permettraient le chargement d'un cœur avec seulement du MOX, parce que les dispositions nécessaires ont été prises pour assurer un contrôle supplémentaire. Aux États-Unis, trois centrales (Système 80) de l'Arizona Public Services Company à Palo Verde pourraient être utilisées. La Russie envisage aussi de construire jusqu'à cinq VVER-640 (NP-500) réacteurs (l'instrumentation et les systèmes de contrôle seraient fournis par Siemens). Cependant, même si l'autorisation d'un chargement à 100% avec du MOX était donnée, le pourcentage de plutonium dans le MOX serait certainement moindre. Il faudrait alors fabriquer plus de combustible MOX. Il semble donc que les avantages de cette proposition, du point de vue de la rapidité d'évacuation, soient relativement minimes. Le rapport dit "qu'on pense" que les cœurs des VVER-640 pourraient être chargés à 100% avec un MOX d'une teneur de 3,7% de plutonium.<sup>6</sup>

### Les réacteurs CANDU

Les réacteurs canadiens à eau lourde (les réacteurs "CANDU", qui utilisent de l'uranium naturel comme combustible et de l'eau lourde comme caloporteur et modérateur) constituent une troisième option prise en considération par les États-Unis et la Russie. Contrairement aux REO, qui sont périodiquement arrêtés pendant la recharge en combustible, ces réacteurs sont rechargés en continu.

Les réacteurs CANDU seraient chargés à 100% avec du MOX. D'après l'Énergie atomique du Canada, limitée (EACL), les cœurs des réacteurs CANDU peuvent utiliser, sans modifications, 100% de MOX contenant 0,5 à 3 pour cent de plutonium. Il faudrait néanmoins de nouvelles autorisations parce qu'aucun réacteur CANDU n'est à présent autorisé à utiliser du MOX. Les réacteurs CANDU pourraient recevoir 100% de MOX parce qu'ils ont l'espace nécessaire à des ailettes de contrôle (semblable aux barres de contrôle) supplémentaires qui pourraient être nécessaires.

Pour ce qui est du contrôle, il semble que l'utilisation

du MOX dans les réacteurs CANDU présente un certain nombre d'avantages importants. La production d'énergie par unité de combustible serait plus grande avec du MOX qu'avec du combustible à l'uranium naturel. Avec des productions d'énergie plus élevées, le volume des déchets radioactifs de haute activité produit par ces réacteurs serait plus petit que celui maintenant produit par les réacteurs CANDU.

Malgré cela, les réacteurs CANDU ont aussi beaucoup de désavantages, comme par exemple la nécessité d'un transport international du MOX qui peut être chimiquement séparé relativement facilement en uranium et en plutonium utilisable pour les armes. Parce que les réacteurs CANDUS utilisent des petites grappes de combustible (parce qu'ils sont rechargés en continu), une sécurité plus grande contre le vol et le détournement du plutonium est nécessaire. L'utilisation des réacteurs CANDU nécessiterait peut-être la production d'un plus grand volume de MOX que l'utilisation des REO parce que le combustible contiendrait entre 1,5 et 2,7% de plutonium<sup>7</sup> contre les 2,5 à 6,8% pour les REO (suivant le type de réacteur).<sup>8</sup>

### Les réacteurs à neutrons rapides

Les États-Unis ont mis fin à leur programme de réacteurs à neutrons rapides (aussi appelés surgénérateurs) à cause de leur coût élevé et des dangers de la prolifération. Cependant, Minatom continue une recherche poussée sur les surgénérateurs. A présent, Minatom exploite un réacteur à neutrons rapides, le BN-600 à Beloyarsk, chargé avec du combustible à l'uranium hautement enrichi. Quatre réacteurs à neutrons rapides supplémentaires ont été prévus, trois à Maïak et un à Beloyarsk. La construction de deux de ces réacteurs avait été commencée (un à chaque site) dans les années 80, mais elle a été arrêtée au début des années 90 pour manque d'argent et pour raison à l'opposition écologique locale. Minatom a récemment annoncé son intention de relancer la construction et l'autorisation de ces projets est maintenant à l'étude mais le financement est toujours très incertain.

On peut éliminer du plutonium avec un réacteur à neutrons rapides en enlevant les couvertures fertiles autour du cœur, faisant ainsi passer le réacteur d'une production à une consommation de plutonium (bien que cela ne veuille pas dire que tout le plutonium est consommé, mais seulement qu'il y en a moins dans le combustible irradié que dans le combustible neuf). Bien sûr, un des problèmes posés par les surgénérateurs du point de vue de la prolifération est qu'on peut introduire une couverture d'uranium et l'utiliser pour fabriquer plus de plutonium, y compris de qualité militaire et de qualité "super".

Minatom propose de construire un BN-800 à Maïak pour l'évacuation du plutonium. Les BN-800 sont

LIRE LA SUITE, PAGE 15

conçus pour accepter 100% de MOX et le rapport indique qu'un réacteur BN-800 pourrait utiliser 1,6 tonnes de plutonium par an. L'évacuation de 50 tonnes de plutonium serait alors accomplie en 30 ans. Les BN-800 sont conçus pour accepter du MOX fabriqué avec du plutonium de qualité réacteur, mais, basé sur des calculs vieux de 20 ans, le rapport indique que l'utilisation du plutonium de qualité militaire ne changerait pas d'une façon importante le fonctionnement du réacteur. Il semble donc qu'une nouvelle évaluation indépendante soit nécessaire vu l'importance du sujet.

Minatom a aussi l'intention de finir la construction du deuxième BN-800 à Beloiarsk qui pourrait être alimenté avec du MOX contenant à peu près 30 tonnes de plutonium civil déjà séparé à l'usine de RT-1 à Maïak. Ce deuxième réacteur pourrait également servir de réserve pour l'évacuation du plutonium.

Le rapport déclare que le BN-600 en service pourrait être utilisé comme réacteur de démonstration pour l'utilisation du MOX dès l'an 2000. Ceci suppose un financement le plus tôt possible pour les usines de conversion et de fabrication. Cependant le BN-600 ne peut fonctionner qu'avec un cœur partiellement chargé en MOX, et le rapport dit qu'il faudrait faire des recherches supplémentaires sur la sûreté d'utilisation du MOX dans ce réacteur sans la présence de couvertures fertiles radiales. Ce réacteur pourrait consommer environ 0,5 tonnes de plutonium par an, soit environ 5 tons d'ici sa mise hors service en 2010.

L'évacuation dans les surgénérateurs pose un certain nombre d'autres risques au niveau de la sûreté et de la prolifération. Le MOX des surgénérateurs a une teneur en plutonium plus élevée que celui des REO. A cause de la teneur plus élevée dans le combustible, il y aurait également plus de plutonium dans le combustible irradié: à peu près 20% d'après le rapport. Bien que Minatom déclare que le dossier de sûreté et écologique du BN-600 est "excellent", le rapport note qu'il y a eu environ 30 fuites de sodium durant les 14 premières années de fonctionnement. De plus, le retour d'expérience internationale avec les surgénérateurs n'a pas été très brillante. Les problèmes de fonctionnement, techniques et de sûreté, ont donné lieu à des arrêts permanents ou temporaires de réacteurs de ce genre aux États-Unis, au Japon et en France.

#### **La sûreté des REO et les questions d'autorisation du MOX**

La grande majorité des REO n'est pas conçue pour l'utilisation du plutonium comme combustible. Bien que le plutonium-239 et l'uranium-235 soient tous les deux des matériaux fissiles qui produisent des quantités d'énergie comparables par unité de poids, ils sont différents en tant que combustible pour les réacteurs. Ces différences affectent la sûreté du réacteur. Cet

ensemble de préoccupations de base touche au pilotage du réacteur. La réaction en chaîne dans un réacteur doit être maintenue avec une extrême précision. Le contrôle est obtenu grâce à des grappes de contrôle faites, en général, de bore et (dans les REO) en ajoutant du bore dans l'eau. Les grappes de contrôle permettent la croissance et la décroissance de la puissance du réacteur ainsi que l'arrêt réglé du réacteur. Elles empêchent l'emballement des réacteurs qui pourrait résulter en accidents catastrophiques.

Il faut remarquer que, bien que tous les REO civils contiennent une certaine quantité de plutonium produite durant le fonctionnement du réacteur à partir de l'uranium-238 présent dans le combustible, la teneur en plutonium est d'environ un pour cent ou moins dans le cas d'une utilisation d'uranium faiblement enrichi. Quant le MOX est utilisé, la teneur en plutonium serait, à n'importe quel moment, considérablement plus élevée. C'est cette différence qui crée la plupart des problèmes de contrôle du réacteur.

Un changement de combustible peut affecter la capacité des grappes de contrôle à fournir le contrôle nécessaire au pilotage du réacteur et il est possible que des modifications du réacteur soient nécessaires avant qu'un nouveau combustible puisse être utilisé. Donc, un changement quelque peu important de combustible nécessite une nouvelle autorisation du réacteur.

Plusieurs différences entre l'utilisation du MOX et du combustible à l'uranium influencent la sûreté:

- Le taux de fission du plutonium a tendance à augmenter avec la température. Cela peut avoir un effet négatif sur le contrôle du réacteur et nécessiter des mesures compensatoires. Ce problème est plus important pour le MOX fabriqué avec du plutonium de qualité militaire que pour celui fabriqué avec du plutonium de qualité réacteur.
- Le contrôle du réacteur dépend de la petite fraction de neutrons émis quelques secondes à quelques minutes après la fission de l'uranium ou du plutonium (les neutrons retardés). La fission de l'uranium-235 produit environ 0,65% de neutrons retardés, mais le plutonium n'en produit qu'environ 0,2%. Il faut donc mettre en place des dispositifs pour accroître le contrôle si du combustible au plutonium est utilisé et si les niveaux de contrôle et de vitesse en place sont jugés insuffisants.
- Dans les réacteurs qui utilisent du plutonium les neutrons ont une énergie moyenne plus grande que ceux des réacteurs qui utilisent du combustible à l'uranium. Cela a pour conséquence d'accroître les dommages infligés par les radiations aux différents éléments du réacteur.
- Les neutrons ont une plus grande probabilité d'être capturé par le plutonium que par l'uranium. Il faut

plus d'absorbants de neutrons pour contrôler le réacteur.

- En cas d'accident grave, la proportion plus forte de plutonium dans le combustible augmenterait la libération de plutonium et d'autres éléments transuraniens dans l'environnement.
- L'irradiation du MOX en réacteur produit de plus grandes quantités de transuraniens que celle du combustible à l'uranium, le MOX irradié dégage donc plus de chaleur.

En général, les questions concernant le pilotage du réacteur, en fonctionnement normal comme en cas d'urgence, sont les plus cruciales. La plupart des experts indépendants ont recommandé de limiter à un tiers environ le chargement de MOX dans les REO, à moins que le réacteur soit spécialement conçu pour recevoir un chargement à 100%. Toutefois, l'utilisation partielle du MOX dans les cœurs pose des difficultés

d'ordre pratique puisque le MOX est réparti au milieu du combustible à l'uranium. Les caractéristiques différentes du point de vue du contrôle, de l'irradiation et de l'énergie thermique donnent lieu à des conditions hétérogènes dans le réacteur qui peuvent compliquer le fonctionnement et le pilotage. Certains exploitants de réacteurs affirment qu'ils peuvent utiliser des cœurs complètement constitués de MOX sans avoir à modifier le réacteur ou les grappes de contrôle. Ces affirmations et leurs implications pour la sûreté doivent faire l'objet d'une vérification indépendante.

Les détails de la procédure d'autorisation aux États-Unis sont bien connus. C'est un processus compliqué et cher, avec une enquête d'utilité publique qui sera presque certainement litigieuse, comme le reconnaît le rapport commun. Cependant le rôle de Gosatomnadzor, l'agence russe de la réglementation nucléaire n'est pas encore clair, pas plus que la question de savoir si elle disposera de suffisamment de moyens pour assurer un processus d'autorisation

LIRE LA SUITE, PAGE 17

## LE PILOTAGE D'UN RÉACTEUR

Le pilotage d'un réacteur nucléaire se fait grâce au contrôle du taux de réactions de fission dans le réacteur. La production d'énergie est directement proportionnelle au taux de réactions de fission. Quand un réacteur est critique, sa puissance de production est maintenue. Quand le réacteur est sur-critique sa puissance de production augmente et quand il est sous-critique, sa puissance diminue jusqu'à l'arrêt du réacteur. La réactivité définit la condition critique du réacteur. Une réactivité positive correspond à un réacteur sur-critique, une réactivité nulle correspond à un réacteur critique, et une réactivité négative correspond à un réacteur sous-critique. Le taux de fissions dans un réacteur est contrôlé grâce à l'insertion et au retrait d'un matériau absorbant de neutrons comme le bore, sous forme de barres de contrôle qui sont réparties parmi les crayons de combustibles. (Dans les réacteurs à eau sous pression, le bore peut aussi être ajouté directement à l'eau). Grâce à l'insertion et au retrait des barres de contrôle (qui absorbent les neutrons disponibles pour les réactions de fission), le taux de réactions de fission et, par là même, la puissance de production peuvent être contrôlés.

Le pilotage du réacteur est possible grâce à une caractéristique propre au phénomène de fission. Alors que la majorité des neutrons émis de la fission sont libérés immédiatement, (dits neutrons instantanés), quelques-uns sont émis plusieurs secondes voire minutes plus tard. Ces derniers sont appelés neutrons différés. La fission de l'uranium-235 dans

un réacteur thermique produit une proportion de neutrons différés de 0,65 pour-cent. Dans le cas de la fission du plutonium-239, la proportion n'est que de 0,2 pour-cent.

Si la réactivité reste au-dessous de la proportion des neutrons différés, le réacteur peut être contrôlé. Mais si elle dépasse cette proportion, le contrôle est perdu, il y aura un emballement de la réaction nucléaire en chaîne aboutissant à la destruction du réacteur. C'est ce qui s'est passé à Tchernobyl. Une fraction plus petite de neutrons différés peut avoir un effet négatif sur le contrôle du réacteur en situation d'urgence, à moins que le réacteur soit équipé en conséquence.

Le plutonium absorbe plus efficacement les neutrons, non seulement aux énergies pour lesquelles les réacteurs à eau ordinaire sont conçus, mais aussi à des énergies quelque peu plus élevées. Amener le combustible à des températures supérieures aux températures de fonctionnement normal a tendance à augmenter le taux de fissions du plutonium qui, à son tour, augmente la température. Ce phénomène appelé coefficient positif de température de la réactivité (une boucle de feed-back positif de température et réactivité) peut poser des problèmes de contrôle du réacteur. Le problème peut être rectifié en ajoutant des absorbants de neutrons, comme par exemple l'erbium, qui a la caractéristique d'absorber des neutrons à certaines énergies particulières.



sérieux. Gosatomnadzor n'a pas encore commencé à aborder les problèmes d'autorisation du MOX, et la participation du public dans ce processus reste un point d'interrogation. Le rapport ne donne pas de détail sur le processus russe d'autorisation mais dit seulement que "il est présumé que toutes les installations seront autorisées par les autorités nationales appropriées."

### Le combustible MOX irradié

Le plutonium est à la fois produit et consommé quand le MOX est utilisé dans les réacteurs. Le MOX irradié contient plus de plutonium que le combustible classique irradié (le combustible irradié résultant du chargement d'un REO avec du combustible à l'uranium faiblement enrichi). La teneur typique en plutonium du combustible classique irradié des REO est à peu près de un pour cent à son déchargement du réacteur. La quantité résiduelle de plutonium dans le MOX irradié dépendrait de la teneur initiale en plutonium de celui-ci (le pourcentage de plutonium dans le combustible), de la durée de combustion du combustible et de la configuration dans laquelle le combustible est utilisé.

Pour les réacteurs à eau ordinaire, le NAS calcule que le plutonium résiduel dans le combustible usé irait de 1,6 pour cent (pour un chargement limité à 30% de MOX contenant 4% de plutonium) à 4,9% (pour un chargement total en MOX contenant 6,8% de plutonium). Des teneurs allant de 2,5 à 6,8% de plutonium ont été proposées.

L'évacuation en couches géologiques profondes du MOX irradié est compliquée non seulement par la concentration plus élevée de plutonium dans le MOX, mais aussi par les importantes quantités de transuraniens dans le combustible irradié. De ce fait, le MOX irradié dégage plus de chaleur que le combustible classique irradié. La présence de plus grandes quantités de transuraniens, comme l'américium-241, est aussi la cause de températures plus élevées et ralentit la décroissance thermique. Il est donc possible que l'évacuation du MOX irradié nécessite le réexamen de toute une série de questions, comme par exemple la modification des conteneurs pour le transport et l'évacuation, et la modification des châteaux pour le stockage du combustible irradié sur le site. Par exemple, les températures plus élevées risquent de poser des problèmes d'entreposage sur le site des réacteurs qui ont un espace limité dans leur piscine pour le combustible irradié. Ces températures plus élevées risquent aussi de nécessiter plus de place dans le dépôt géologique profond, à moins qu'un dépôt soit conçu pour accepter du combustible dégageant plus de chaleur et supporter des températures plus élevées. Une demande d'espace supplémentaire s'accompagnerait de frais d'évacuation plus élevés. De plus, si la quantité résiduelle de gallium dans le MOX irradié est trop importante, la gaine du combustible usé

pourrait se détériorer. Cela pourrait poser de nouveaux problèmes pour évaluer l'adéquation du site d'évacuation, et poser de plus grands risques de contamination de la nappe phréatique. La concentration de gallium qui pourrait avoir un effet négatif sur l'intégrité du combustible irradié n'est pas connue avec certitude.

Les différences entre le MOX irradié et le combustible à l'uranium irradié compliquent également le retraitement.

### Les dangers supplémentaires de prolifération

Alors que l'essentiel du discours officiel sur le MOX affirme que celui-ci "brûlerait" le plutonium, en réalité il y a à la fois consommation ("incinération") et production de plutonium dans les réacteurs nucléaires, comme on l'a noté plus haut. La fonction principale des options d'évacuation du plutonium n'est pas de se débarrasser de tout le plutonium. Il s'agit plutôt de:

- mélanger le plutonium avec d'autres matériaux, en général des produits de fission très radioactifs, pour rendre très difficile une nouvelle séparation en vue de l'utiliser dans les armes;
- empêcher le détournement du plutonium en le transformant pour l'entreposage en une forme très radioactive représentant un danger mortel pour quiconque voudrait le voler.

Le rapport évalue chaque option d'évacuation d'après des critères de non-prolifération suivant la rapidité d'élimination du plutonium, sa résistance au vol ou au détournement, et sa résistance à la réextraction ou la réutilisation. L'accord avait conclu que pour assurer l'objectif de rapidité d'élimination, les options devraient aboutir à l'évacuation de 50 tonnes de plutonium en moins de 20-40 ans. Le critère généralement utilisé pour évaluer la résistance au vol et au détournement de la forme finale du plutonium après évacuation est le "spent fuel standard" (le critère du combustible irradié). Ce critère a été identifié par la NAS dans leur rapport de 1994. Il signifie que le plutonium devrait être aussi inaccessible au vol, au détournement, et la réextraction, que l'est le plutonium qui est contenu dans du combustible irradié à l'uranium faiblement enrichi.


Cependant, dans le contexte de la sécurité du plutonium à long terme, ce critère a un défaut important. Le "critère de combustible irradié", par nature, suppose que le plutonium restera dans le combustible irradié (ou dans la forme quelconque dans laquelle il a été placé)—c'est-à-dire, qu'il est destiné à l'enfouissement géologique. Cependant le rapport dit que la politique russe ne prévoit pas "l'enfouissement définitif des matériaux contenant du plutonium" (ce qui comprendrait le combustible irradié), mais au lieu de cela la

réextraction du plutonium grâce au retraitement. Minatom a très clairement déclaré à maintes occasions qu'il a l'intention de retraiter le MOX irradié, enlevant au "critère de combustible irradié" tout son sens à long terme.

### Les questions de financement

Même si le plutonium est utilisé dans les réacteurs pour produire de l'électricité, l'utilisation du MOX entraînera des frais nets. Ceci, parce qu'il coûte plus cher de fabriquer du MOX (même quand le plutonium est gratuit) que d'acheter du combustible à l'uranium faiblement enrichi, en tenant compte de tous les coûts y compris le prix des matières premières (pour plus de discussion sur les prix voir E&S no.1). Selon les estimations de la NAS, la fabrication du MOX coûtera environ \$2 milliards pour 50 tonnes de plutonium. Si la

teneur en plutonium du MOX est de 5%, le coût supplémentaire pour l'évacuation de 50 tonnes de plutonium occasionnerait un coût supplémentaire d'environ \$500 millions pour la seule fabrication du MOX, comparé à celui du combustible à l'uranium. Les dépenses réelles pour les États-Unis seront vraisemblablement bien plus élevées parce que les compagnies d'électricité veulent des subventions pour mener à bien l'évacuation, et parce que beaucoup d'autres retards et incertitudes feront en toute probabilité monter les prix.

Les estimations globales de coût, aux États-Unis et en Russie, diffèrent en raison des différences dans les structures de fonctionnement des réacteurs et les politiques d'évacuation des combustibles irradiés et qui exploite ces réacteurs. Aux frais de fabrication du combustible viendraient s'ajouter des frais d'autorisation pour les réacteurs, des frais de transport et de contrôle, et des frais de construction et de modification des réacteurs (si nécessaire). En général, les estimations des coûts russes sont moins sûres, à cause de la situation économique qui subit des changements rapides. Du fait de la politique de retraitement du combustible usé, les estimations russes des dépenses ne comprennent que le coût de 50 ans d'entreposage plutôt que celui de l'évacuation définitive. 

## OFFRE DE POSTE DE CHERCHEUR

### Center for International Security and Arms Control Stanford University

**L**e Centre international pour la Sécurité et le Contrôle des armements de l'Université de Stanford annonce son programme de bourse pour l'année académique de 1998-99:

#### Programme de recherche pour les scientifiques de troisième cycle

Des positions de chercheur d'une durée d'un an pour des ingénieurs et scientifiques intéressés par une recherche interdisciplinaire sur des questions techniques et de politique. Les sujets potentiels de recherche comprennent: les questions de politique se rapportant aux armes nucléaires, biologiques et chimiques et aux systèmes de missiles; les perspectives pour un contrôle international des armes de destruction massive; la sûreté et la sécurité des armes nucléaires; la diffusion mondiale de la technologie d'information; l'évaluation des défenses ABM; les contrôles sur l'exportation de la technologie de pointe; la reconversion militaire; la sécurité de l'environnement; les questions de sécurité et de développement de l'énergie; et la modélisation des problèmes de sécurité. La date limite d'application est le 16 février 1998.

Contactez: Barbara Platt, CISAC, Stanford University, 320 Galvez St., Stanford, CA 94305-6165; Adresse internet: [bplatt@leland.stanford.edu](mailto:bplatt@leland.stanford.edu). Page web: <http://www-leland.stanford.edu/group/CISAC/>

- 1 Presque 12 tonnes sur ces 50 tonnes produites dans les usines militaires ne sont pas de qualité militaire.
- 2 Sauf mention contraire, les aspects techniques de l'utilisation du MOX dans les centrales nucléaires proviennent de: Panel on Reactor-Related Options for the Disposition of Excess Weapons Plutonium, Committee on International Security and Arms Control, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor-Related Options*, National Academy Press, Washington D.C., 1995.
- 3 La construction en Europe d'assemblages d'essai principal a été envisagée pour permettre au MOX d'être testé dans des réacteurs avant de construire de nouvelles usines, cependant cela semble de moins en moins probable.
- 4 Sauf mention contraire, les éléments qui se rapportent aux options du Département de l'Énergie se trouvent dans: *Storage and Disposition of Weapons-Usable Fissile Materials Final Programmatic Environmental Impact Statement: Summary*, Office of Fissile Materials Disposition, U.S. Department of Energy, December 1996. Les informations sur les options russes sont obtenues de la *Joint United States/Russia Plutonium Disposition Study*, September 1996.
- 5 NAS 1995, p. 137
- 6 Joint report, p.WR-27-WR-29.
- 7 Voir NAS 1995, pp.146-151, pour une discussion sur les avantages et désavantages de l'utilisation des réacteurs CANDU comparés aux REO américains. La fourchette de 1,5 à 2,7 % de plutonium a été suggérée par le fabricant de réacteurs.
- 8 NAS 1995, pp. 121-122

Voici un extrait d'une lettre concernant le No.2 d'Énergie et Sécurité:

"On peut lire dans une multitude d'articles, et qu'ils soient "pro ou antinucléaires", l'affirmation du type de celle que vous publiez en page 6: "La crise de l'énergie de 1973 a eu comme conséquence d'accorder à l'énergie nucléaire une plus grande place dans la politique de l'énergie."

Le tableau 2 que je vous joins aidera, je pense à prouver l'inexactitude d'une telle affirmation". . . Il montre clairement que les premières centrales de production d'électricité (il y a eu des reacteurs longtemps avant) ont fourni de l'électricité dès 1977. . . Vu le délai entre la décision de construire une centrale et son raccordement au réseau de distribution, qui se chiffre en années, il me semble donc bien que l'accroissement, et donc le départ de

l'énergie nucléaire, a bien eu lieu AVANT la crise de 1973.

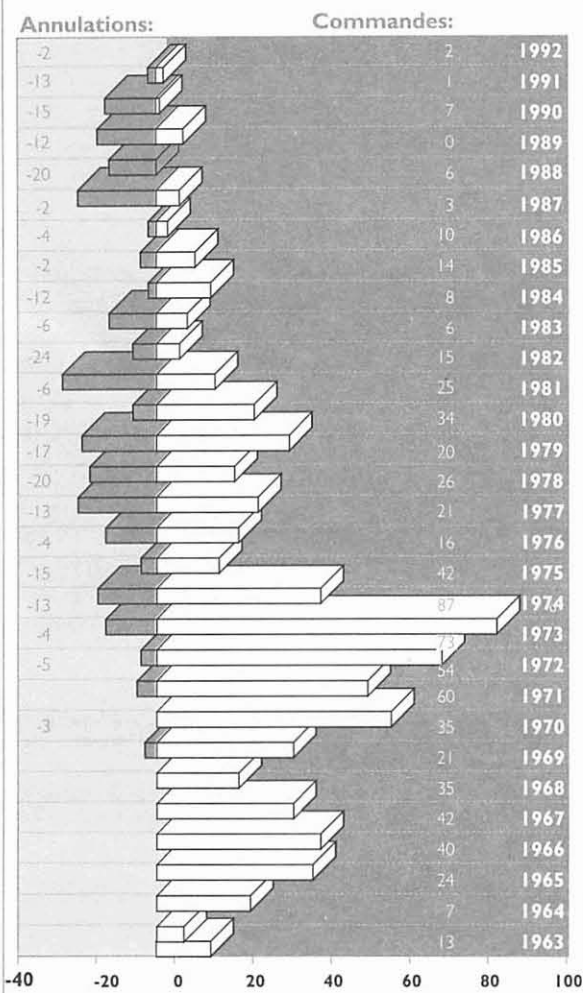
En réalité, ce choix (du nucléaire) a bien été antérieur à 1974 car il a été consacré par une décision "dictatoriale" de Ch. De Gaulle, signée le 30 octobre 1945. . . créant le Commissariat à l'énergie atomique (CEA).

Yves Renaud

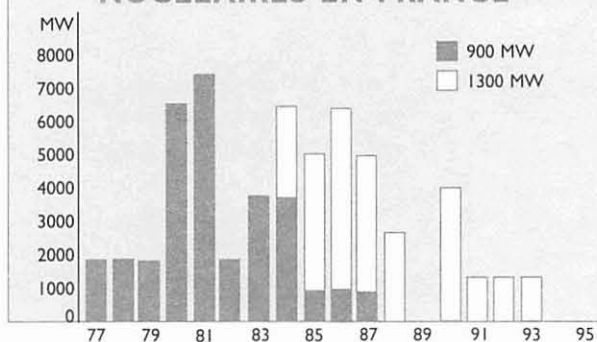
**Réponse de IEER**

Comme le tableau 1 (envoyé aussi par Yves Renaud) le montre, la crise de l'énergie de 1973 n'a pas eu un effet prolongé sur les commandes de centrales nucléaires. Après une brève augmentation un déclin a suivi, ce déclin étant lui-même accompagné d'annulations. Cependant, la crise pétrolière semble avoir eu un effet plus grand en France. Les tableaux 2 et 3 montrent que l'accroissement des commandes et de la mise en service des centrales nucléaires françaises s'est bien produit après la crise de 1973. Il n'en reste pas moins que le choix français du nucléaire remonte à très loin, dès octobre 1945, avec la création de la Commission à l'Énergie atomique.

**TABLEAU 1  
CONSTRUCTION DE CENTRALES  
NUCLÉAIRES DANS LE MONDE**



**TABLEAU 2  
MISE EN SERVICE DES CENTRALES  
NUCLÉAIRES EN FRANCE**



Source: "Le point sur le programme nucléaire français", novembre 1996

**TABLEAU 3  
COMMANDES DES CENTRALES  
NUCLÉAIRES**

	1971-75	76-80
Framatome	19	20
Total	169	52
Moyen par an	34	10

Source: Jim Falk, *Global Fission* (London: Oxford University Press, 1982), p. 112.

Même les modestes objectifs de l'actuel programme MOX américain d'élimination du plutonium ont peu de chance d'être réalisés dans les délais imposés. L'élimination du plutonium par le biais du MOX prendra au moins 30 ans en Russie et probablement autant aux États-Unis. Entre temps beaucoup de plutonium sera entreposé sous une forme utilisable pour les armes. Cela prendra peut-être même beaucoup plus longtemps parce que beaucoup de gens aux États-Unis comme en Russie s'opposent à l'utilisation du combustible MOX, du fait de son rôle potentiel dans la mise en place d'une économie du plutonium. Une polémique intense s'est manifestée dans les médias et les associations militantes depuis que les États-Unis ont déclaré, en décembre dernier, qu'ils incluraient l'option MOX dans leur programme d'élimination du plutonium. En Russie, depuis 1989, il y a eu une opposition publique continue (en dehors des villes nucléaires) à la construction d'usines de retraitement. Cette opposition continue aujourd'hui. La construction du surgénérateur BN-800 et de l'usine de retraitement RT-2 a été arrêtée à la fin des années 80 et au début des années 90 du fait de l'opposition locale et du manque d'argent.

Il ne fait aucun doute que la Russie a grand besoin d'aide financière pour mettre en sécurité ses matières nucléaires utilisables pour des armes et rendre inutilisable à des fins militaires son surplus de plutonium, une

aide bien supérieure à celle que les États-Unis fournissent actuellement. En fournissant une aide plus grande, les États-Unis obtiendraient d'énormes gains de sécurité vis-à-vis de la Russie. Mais une aide éventuelle des États-Unis à la création d'une infrastructure du plutonium en Russie aurait un effet contraire à celui escompté exactement pour les mêmes raisons que de telles dépenses devraient être évitées aux États-Unis.

Les gouvernements américain et russe devraient décider maintenant de vitrifier leur plutonium et de stocker les conteneurs de verre puisque la Russie ne veut pas traiter les matériaux contenant du plutonium comme déchets. Jusqu'ici, un des avantages de ces négociations est que la Russie a accepté, au moins, de réfléchir à l'option d'immobilisation. La vitrification suivie d'un entreposage sûr, serait une façon plus sûre, plus rapide et plus économique de répondre à l'objectif de sécurité, urgent et à court terme, qui consiste à transformer les surplus de plutonium en une forme inutilisable pour les armes et à gagner le temps nécessaire pour arriver à des accords solides sur les problèmes à long terme de sécurité qui concernent le plutonium.

- 1 Joint United States/Russian Plutonium Disposition Study, September 1996, p.ExSum-2.
- 2 Ibid, p. WR-35-37.
- 3 Ibid.



*Énergie et Sécurité* est un bulletin sur la non-prolifération, le désarmement et les énergies soutenables. Il est publié quatre fois par an par:

**The Institute for Energy and  
Environmental Research**

6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912,  
USA

Phone: (301) 270-5500 FAX: (301) 270-3029

Adresse Internet: [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)

Page Web: <http://www.ieer.org>

L'Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement (IEER) fournit au public et aux décideurs politiques des études techniques claires et scientifiquement solides dans un grand nombre de domaines. L'objectif de l'IEER est d'apporter une analyse scientifique d'excellente qualité aux questions politiques touchant le public tout en favorisant la démocratisation de la science et un environnement plus sain.



gique seraient d'environ \$350 du kilo de métal lourd, ou seulement environ un sixième du coût d'une usine privée PUREX. Les expériences passées indiquent que les estimations de coûts initiales augmenteront probablement en même temps que la technologie se développe. Le rapport cite une estimation indépendante qui détermine que le coût serait 57 % plus élevé que le procédé PUREX.

En résumé, l'étude conclue qu'aucune technologie de séparation et de transmutation ne pourrait éviter un programme d'enfouissement, qui restera indispensable pour la gestion des déchets des réacteurs en service.

- 1 Il peut être obtenu à la National Academy Press, Washington D.C., \$79.95 plus frais d'envoi. Le sommaire du rapport se trouve sur la World Wide Web à <http://www.nas.edu>.
- 2 Les protons, dans les accélérateurs, s'écrasent à grande vitesse sur une cible de plomb et cassent les noyaux de plomb, libérant ainsi des neutrons.

