

Le plutonium comme source d'énergie: l'industrie en chiffres

*Les stocks civils de plutonium s'accumulent
et l'on s'inquiète de savoir comment les utiliser et les gérer*

par Pierre M.
Chantoin et
James Finucane

Le plutonium est un élément qui se forme dans le combustible des réacteurs nucléaires pendant leur fonctionnement. Cela pose une question délicate car, s'il peut être séparé, stocké puis réutilisé dans du combustible recyclé pour alimenter des centrales nucléaires, il peut aussi, comme on le sait, être utilisé dans des armes.

Le présent article, laissant de côté les aspects militaires, passe en revue un certain nombre d'aspects importants de l'utilisation du plutonium comme source d'énergie dans le secteur nucléaire civil: la formation du plutonium dans le combustible nucléaire, sa séparation pendant le retraitement et sa réutilisation (recyclage) dans un type spécial de combustible nucléaire, le combustible à oxydes mixtes (MOX) d'uranium et de plutonium. Il aborde aussi la question de l'accumulation probable des stocks civils de plutonium dans le monde entier, et examine le rôle que pourrait jouer l'Agence pour faire en sorte que ces quantités soient manipulées, transportées, stockées et gérées de façon sûre. Cette accumulation temporaire — qui va sans doute se poursuivre encore pendant dix à 30 ans — est une conséquence du retard pris par les programmes nationaux de construction de réacteurs surgénérateurs rapides qui auraient utilisé le plutonium. Cette situation risque de se prolonger tant que l'on ne disposera pas d'usines de fabrication de combustible MOX pour les réacteurs à eau ordinaire, qui constituent la principale filière en service et en construction aujourd'hui.

Le plutonium formé dans les combustibles nucléaires

Au cours des 15 à 20 prochaines années, les centrales nucléaires du monde entier produiront une importante quantité de plutonium qui viendra s'ajouter aux stocks existants (voir les graphiques page 41). En 1965, la production de plutonium était

inférieure à une tonne. En 1992, avec l'augmentation du nombre de centrales en service, elle était passée à 50 tonnes (contenues dans environ 9000 tonnes de combustible irradié). Depuis que l'on produit industriellement de l'électricité nucléaire, environ 600 tonnes de plutonium se sont accumulées dans des combustibles irradiés. D'après les prévisions, le chiffre atteindrait 1000 tonnes en 2005 et 1500 tonnes en 2010*. Etant donné qu'une tonne de plutonium fissile a théoriquement une énergie équivalant à environ 22 millions de mégawattheures d'électricité, certains pays ont choisi de retraiter le combustible irradié. Cette opération vise à récupérer le plutonium et à le recycler dans du combustible MOX destiné à être utilisé dans des réacteurs. La qualité du plutonium ainsi récupéré dépend principalement du type de réacteur et du niveau d'irradiation du combustible (taux de combustion) pendant l'opération.

Retraitement du combustible ou stockage

Le retraitement est une technologie éprouvée mise en œuvre à l'échelle industrielle (voir le tableau). En 1992, la capacité totale de retraitement, pour les combustibles de tous types, était estimée à 4015 tonnes de métal lourd (tML), ce qui ne représente que 40% environ du combustible déchargé des réacteurs de puissance. Toutes les usines de retraitement en service appliquent le procédé Purex. L'emploi de combustible ayant un taux de combustion plus élevé (jusqu'à 45 mégawatt-jours par kilogramme de métal lourd (MWj/kg ML) ou de combustible MOX ne devrait pas poser de problèmes majeurs.

Certains pays sont en train d'accroître leur capacité de retraitement. La France est en train de modifier son usine UP-2 afin d'en doubler la capacité

* Ces estimations sont les résultats de calculs effectués avec le programme CYBA exploité par la Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets de l'AIEA. Elles sont fondées sur la production d'électricité et des modèles génériques de gestion du combustible et des réacteurs pour chaque type de réacteur en service.

MM. Chantoin et Finucane sont membres de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets de l'AIEA.

Type de combustible	Projections					
	1992	1995	2000	2005	2010	
France	RRG	600	600	0	0	0
	REO	1200	1600	1600	1600	1600
	RNR	5	5	5	5	5
Inde	REL P, RR	200	200	600	600	600
Japon	REO	100	100	900	900	900
Royaume-Uni	RRG	1500	1500	1500	1500	1500
	REO	0	1200	1200	1200	1200
	RNR	10	10	10	10	10
Russie	REO	400	400	400	400	400
Total		4015	5615	6215	6215	6215

Capacité mondiale existante et projetée de retraitement du combustible nucléaire

Note: Chiffres en tonnes de métal lourd par an. RRG = réacteur refroidi par gaz. REO = réacteur à eau ordinaire. RNR = réacteur à neutrons rapides. En Inde, la centrale de Tarapur a un réacteur à eau lourde sous pression (REL P) et le réacteur de Trombay est un réacteur de recherche (RR). En Russie, l'achèvement d'une usine de retraitement d'une capacité annuelle de 1500 tonnes de métal lourd a été reporté.

annuelle (qui passerait à 800 tML), le redémarrage étant actuellement prévu pour 1994 ou 1995. Au Royaume-Uni, la construction de la Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP), à Sellafield, est achevée. Elle devait commencer à fonctionner en décembre 1992, mais sa mise en service a été retardée par des problèmes liés à l'obtention d'une autorisation pour le site. Au Japon, les travaux de construction d'une usine de retraitement à Rokkashomura, d'une capacité nominale de 800 tonnes de métal lourd, ont commencé en avril 1993 et devraient être achevés en l'an 2000.

Jusqu'en 1992 inclusivement, l'industrie a retraité au total environ 46 000 tML de combustibles irradiés provenant, selon le type de combustibles, des réacteurs suivants: 34 000 tonnes pour les réacteurs refroidis par gaz, 11 700 tonnes pour les réacteurs à eau ordinaire et 40 tonnes pour les réacteurs surgénérateurs rapides.

La capacité prévue de retraitement — qui dépend de la demande future de services de retraitement — devrait augmenter jusqu'à la fin du siècle puis se stabiliser (voir le tableau). Il est peu probable que le procédé Purex, qui a fait ses preuves, soit remplacé ou fondamentalement modifié, encore que l'on puisse lui apporter quelques changements et améliorations. Les principales nouveautés dans le domaine du retraitement consisteront sans doute en une diminution des dépenses d'investissement et d'exploitation, une réduction des quantités de déchets et un accroissement de l'automatisation.

Accumulation du plutonium séparé

A la fin de 1992, les stocks mondiaux de plutonium séparé provenant de programmes

Combustible irradié à Sellafield. (Crédit: BNFL)

Installations existantes	Capacités par type de combustibles en 1992			
	RRG	REO	RNR	Autres
Marcoule UP-1 (France)	600			
La Hague UP-2 (France)		400		
La Hague UP-3 (France)		800		
Marcoule APM (France)			5	
Tarapur (Inde)				150
Trombay (Inde)				50
Tokai (Japon)		100		
Kychtym (Russie)		400		
Sellafield (Royaume-Uni)	1500			
Dounreay (Royaume-Uni)			10	
Total	2100	1700	15	200



Pays	Fournisseur	Capacité	Statut
Allemagne	Siemens	25	temporairement arrêtée
	Siemens	120	achevée à 90%
Belgique	Belgonucléaire	35	en service
	Belgonucléaire	40	en projet
France	Cogema	15	en service
	Framatome-Cogema	120	en construction
Japon	Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp.	10	en service
	Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corp.	40	en projet
Royaume-Uni	British Nuclear Fuels	8	en construction
	British Nuclear Fuels	100	en projet

Notes: Chiffres en tonnes de métal lourd par an. Pour ce qui est de la capacité, il a été supposé que la teneur en plutonium du combustible MOX était de 4,5%, sauf pour la PNC (Japon) qui fabrique du combustible contenant 2% de plutonium.

Capacité de fabrication de combustible MOX en 1992 pour les REO

nucléaires civils étaient, sur la base des données communiquées à l'Agence par ses Etats Membres, estimés à 86 tonnes.

Pour estimer les stocks futurs de plutonium, l'AIEA a étudié deux scénarios (voir l'encadré et les graphiques de la page 41). Dans le premier, qui tient compte des politiques nationales en matière de retraitement, les quantités de plutonium produit continuent de dépasser les quantités utilisées jusqu'aux alentours de l'an 2000. Les stocks s'élèveraient alors à 170 tonnes environ. Ils diminueraient ensuite à raison de 7 à 10 tonnes par an.

Le deuxième scénario, fondé sur les données communiquées à l'Agence par ses Etats Membres, donne des résultats assez différents. L'hypothèse est que toutes les usines de retraitement et de fabrication de MOX dont la construction est envisagée seront mises en service à la date prévue et fonctionneront à pleine capacité. Dans ce cas, les stocks d'uranium augmenteraient jusqu'en 1997, atteignant alors environ 120 tonnes, puis diminueraient d'environ 20 tonnes par an à partir de l'an 2000.

La technologie du combustible MOX

L'expérience montre que l'on peut utiliser du plutonium comme matière première pour le combustible à oxyde mixte destiné aux réacteurs de puissance modérés par l'eau. Plus précisément, ce combustible peut alimenter des réacteurs à eau ordinaire, qui équipent la majorité des centrales nucléaires actuellement en service dans le monde. Plusieurs pays envisagent déjà de l'utiliser et des usines destinées à le fabriquer fonctionnent de façon satisfaisante en Allemagne, en Belgique, en France et au Japon. D'autres sont en construction ou à l'état de projet. (Voir le tableau.)

Le combustible MOX s'étant bien comporté dans les assemblages d'essais, on augmente de plus en plus son taux de combustion. Sa viabilité économique dépend de l'équilibre entre les prix de l'uranium et de l'enrichissement et les coûts de fabrication, de retraitement, de gestion des déchets et de stockage du combustible.

Performance du combustible MOX. Le combustible MOX est soumis à des essais depuis plus de 20 ans en Allemagne, en Belgique, en France et au Japon. Les résultats montrent qu'il peut être utilisé de façon sûre dans les réacteurs à eau ordinaire existants dont le cœur en est chargé jusqu'à 30% sans qu'il soit nécessaire de modifier sensiblement les systèmes de conduite des réacteurs. Ils montrent aussi qu'il y a de grandes similitudes entre le combustible MOX et le combustible à dioxyde d'uranium en ce qui concerne le comportement des produits de fission et le comportement thermomécanique dans la gamme des taux de combustion atteints jusqu'à présent. Mais il y a tout de même des différences (nature du combustible, spectre de neutrons, profil de température du combustible). C'est pourquoi l'on procède à d'autres expériences et à l'examen plus poussé d'assemblages d'essais avec un taux de combustion supérieur à 35 MWj/kg ML pour s'assurer qu'il ne se produit pas d'effets indésirables à des taux de combustion plus élevés.

La France, l'Allemagne et le Japon mènent des recherches sur la configuration du cœur afin de porter le chargement de combustible MOX dans la fourchette 50-100%. Mais il faudrait alors soit une nouvelle génération de réacteurs à eau, soit modifier sensiblement les systèmes de conduite des réacteurs actuels.

En Allemagne, un large éventail d'assemblages combustibles MOX destinés à des réacteurs à eau bouillante et à eau sous pression ont été conçus et réalisés. L'usine de Hanau a fabriqué des assemblages combustibles MOX de divers types qui contiennent 5,8 tonnes de plutonium fissile. Une nouvelle usine de fabrication de MOX à l'échelle industrielle a été construite à Hanau, mais son démarrage a été retardé par des problèmes politiques. La capacité de production annuelle devrait augmenter progressivement pour atteindre 120 tonnes en l'an 2000. L'Allemagne a irradié du combustible MOX dans 70 000 crayons combustibles contenus dans 490 assemblages chargés dans six réacteurs à eau sous pression et trois réacteurs à eau bouillante. Le taux de combustion le plus élevé atteint pour les pastilles a été de 53 MWj/kg ML.

En France, 16 réacteurs à eau sous pression sont autorisés à utiliser du combustible MOX, et 410 assemblages combustibles MOX de conception avancée ont été livrés à sept réacteurs différents. Le taux de combustion maximum se situe autour de 39 MWj/kg ML pour les assemblages et à 47 MWj/kg pour les crayons. Tous les assemblages qui sont passés par tous les cycles d'irradiation se sont comportés comme prévu, et aucun crayon n'a

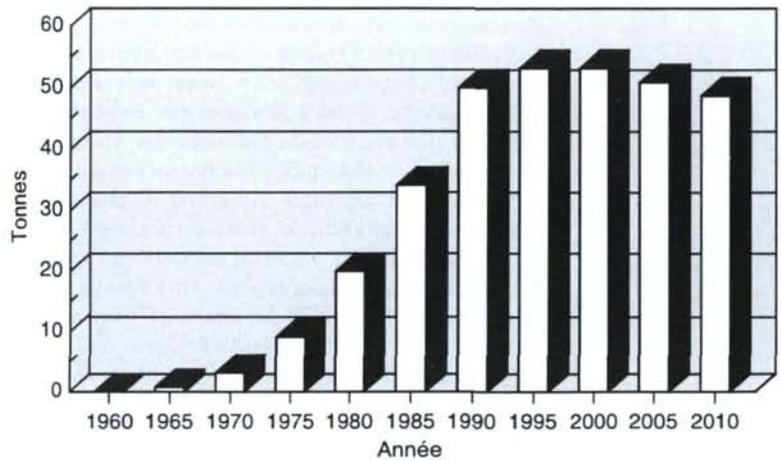
Projection de l'offre d'uranium

Une analyse par l'AIEA de l'évolution des stocks d'uranium au cours des dix années à venir a montré que les estimations étaient sujettes à des incertitudes considérables. Deux scénarios ont été examinés, fondés sur des hypothèses différentes quant aux politiques et projets des différents pays en matière nucléaire (voir le graphique ci-dessous).

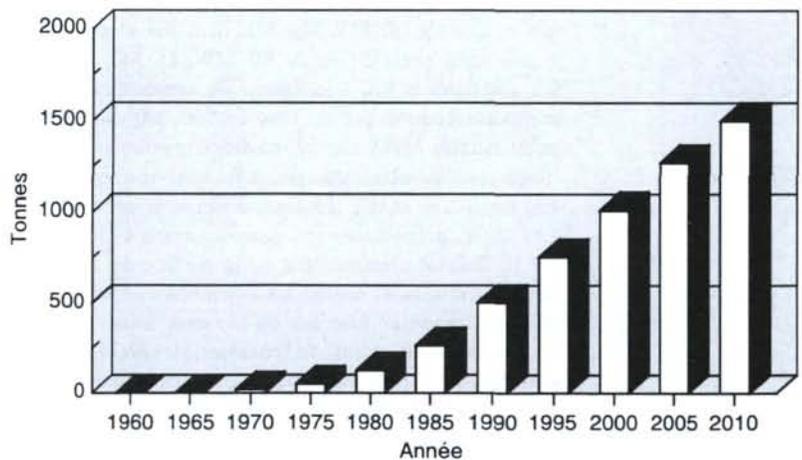
● Le premier avait pour point de départ une baisse progressive des stocks prévus après l'an 2000. Il tenait compte des politiques de retraitement de différents pays et évaluait les capacités probables de fabrication de combustible MOX. Pour cette évaluation, seuls ont été retenus les contrats et les projets fermes. L'accroissement de la capacité française n'a pas été prise en compte. Pour le Royaume-Uni, on a supposé qu'une capacité supplémentaire de 50 tonnes serait construite, mais portée à 100 tonnes seulement si l'Allemagne abandonnait sa politique de recyclage. Il n'était tenu compte dans aucun de ces cas du stock de roulement des usines de fabrication de MOX (représentant environ trois mois d'utilisation normale, soit trois à quatre tonnes de plutonium). Ces considérations combinées donnent un scénario à hypothèse «haute». Du fait que la politique de l'Allemagne, actuellement à l'examen, constituait un élément d'incertitude important, on a procédé à une analyse de sensibilité en supposant que l'Allemagne optait pour l'évacuation directe, que son usine de fabrication de MOX à Hanau n'entraîne pas en service et que le retraitement cessait en 1994. Il en résultait alors une chute tant de la production que des taux d'utilisation du plutonium, mais il n'y avait pas de répercussion notable sur l'accumulation de plutonium à l'échelle mondiale.

● Le deuxième scénario considérait que les stocks prévus disparaissaient au bout d'une dizaine d'années. Les hypothèses de départ étaient que les usines de retraitement fonctionneraient constamment à pleine capacité et que toutes les usines de MOX dont on envisageait la construction entreraient en service aux dates prévues. Il convient ici de faire quelques remarques: 1) ces deux hypothèses sont probablement optimistes; 2) avec les contrats existants, l'utilisation des usines de retraitement à pleine capacité n'est pas assurée au-delà de l'an 2000; 3) au cas où les usines de fabrication de MOX ne seraient pas prêtes à temps, les producteurs d'électricité voudront peut-être différer le retraitement en raison des problèmes liés à l'accumulation d'activité dans l'uranium séparé et au stockage du plutonium. Ces considérations combinées donnent un scénario à hypothèse «basse». Il est probable que la réalité se situe quelque part entre ces deux extrêmes.

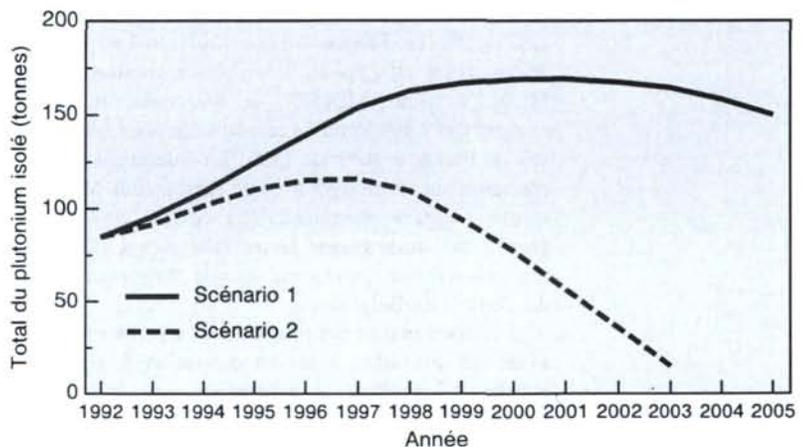
Quantité annuelle de plutonium fissile dans le combustible irradié



Quantité cumulée de plutonium fissile dans le combustible irradié



Projection des stocks civils de plutonium en fin d'année



eu de fuite. En outre, la fabrication, au cours des dernières années, de plus de 60 000 crayons, principalement en Belgique, n'a posé aucun problème.

Le Japon considère le recyclage de l'uranium et du plutonium dans des réacteurs thermiques comme la meilleure option jusqu'à ce que des réacteurs surgénérateurs rapides industriels soient en place. Le Japon a décidé de faire fabriquer son combustible MOX en Europe, avec du plutonium provenant des combustibles irradiés qu'il y fait retraiter et qui, par conséquent, lui appartient. A l'avenir, le plutonium résultant du retraitement effectué au Japon sera utilisé sur place dans une usine de MOX qui reste à construire. Le plutonium produit sera employé dans des réacteurs rapides et des réacteurs thermiques avancés. Une partie importante sera toutefois recyclée dans des réacteurs à eau ordinaire. Quatre assemblages combustibles MOX chargés dans des réacteurs à eau sous pression et deux dans des réacteurs à eau bouillante ont maintenant atteint la fin de leur vie avec des performances satisfaisantes. (Voir dans ce numéro l'article consacré au cycle du combustible nucléaire du Japon.)

Avec le combustible MOX fabriqué en Belgique, les taux maximaux atteints dans la pratique sont maintenant de 70 MWj/kg ML dans les réacteurs à eau sous pression et de 49 MWj/kg ML dans les réacteurs à eau bouillante. Le combustible se comporte comme prévu. Plus de 100 000 crayons combustibles MOX ont été irradiés dans 620 assemblages combustibles chargés dans trois réacteurs à eau bouillante et dix réacteurs à eau sous pression. Les seules défaillances enregistrées depuis 1980 ont été le résultat d'effritement de la surface dû à des débris, qui a aussi touché les assemblages combustibles normaux en uranium de la même usine.

La mise au point du combustible MOX. Le combustible à oxydes mixtes a maintenant fait ses preuves à l'échelle industrielle et joue un rôle important dans l'industrie du combustible nucléaire. Des installations spéciales ont été construites ou sont prévues en Allemagne, en Belgique, en France, au Japon, au Royaume-Uni et en Russie. La Belgique a l'intention de commencer à utiliser ce combustible dans ses centrales nucléaires vers le milieu des années 90. La France compte avoir en l'an 2000 16 réacteurs chargés en assemblages combustibles MOX. L'usine MELOX, à Marcoule, devrait commencer à fabriquer ce combustible pour Electricité de France à partir de 1995. En Allemagne, sept réacteurs ont été chargés avec du combustible MOX, et une vingtaine devraient l'être en l'an 2000. La plupart des assemblages seront fabriqués à Hanau, les autres seront fournis par l'usine Belgonucléaire de Dessel, en Belgique.

Le Japon réalise des programmes à petite échelle avant de procéder à la démonstration à grande échelle et à l'utilisation industrielle dans des réacteurs à eau ordinaire. La démonstration à grande échelle (avec un chargement d'un quart du cœur dans un réacteur à eau bouillante et un réacteur à eau sous

pression) est prévue pour le milieu des années 90, et l'utilisation industrielle (avec chargement d'un tiers du cœur dans cinq réacteurs à eau bouillante et cinq réacteurs à eau sous pression) pour la fin de la décennie.

La Russie, par suite du retard de l'introduction des réacteurs rapides, étudie le recyclage du plutonium pour les réacteurs thermiques. Une nouvelle usine d'une capacité annuelle de 60 tonnes de métal lourd est en construction sur le complexe de Tcheliabinsk, dans le sud de l'Oural. Elle fabriquera du combustible MOX pour les réacteurs rapides, mais pourra aussi en produire pour les réacteurs thermiques VVER-1000. (Voir dans ce numéro l'article consacré au cycle du combustible nucléaire russe.)

La Suisse utilise actuellement du combustible MOX dans ses deux tranches de Beznau, et un ou deux producteurs d'électricité commenceront à recycler du plutonium dans d'autres réacteurs à eau ordinaire vers 1995. Le combustible MOX nécessaire sera fabriqué par Belgonucléaire et par British Nuclear Fuels.

Du point de vue de la recherche-développement, le combustible MOX va continuer de faire l'objet d'une attention spéciale de la part des producteurs d'électricité. Son comportement pendant l'irradiation sera étudié de façon plus poussée dans des conditions de fonctionnement normal et anormal des réacteurs et pour des taux de combustion accrus. L'objectif est de résoudre tous problèmes techniques et opérationnels qui pourraient surgir (par exemple en ce qui concerne la température et le rejet des gaz de fission) par suite des différences entre le combustible MOX et le combustible normal à l'uranium. Les études porteront également sur les modifications de la conception à mesure qu'elles se produisent.

La France et l'Allemagne ont décidé de travailler ensemble à l'étude d'une nouvelle génération de réacteurs à eau pour améliorer le recyclage du plutonium. Par suite de retards dans la mise au point de réacteurs rapides industriels, l'utilisation du plutonium dans des réacteurs thermiques constitue actuellement le seul moyen d'exploiter les matières fissiles récupérées pendant le retraitement.

Gestion sûre des approvisionnements futurs

A mesure que les quantités d'uranium séparé augmenteront, il faudra trouver des moyens de les stocker, de les gérer et de les utiliser de façon sûre. Plusieurs pays ont déjà une bonne expérience de la manipulation, du transport et du stockage du plutonium.

Dans les années qui viennent, l'AIEA pourrait se voir confier de nouveaux rôles afin d'encourager l'intensification de la coopération internationale et d'en accroître l'efficacité pour les questions liées au plutonium. Elle pourrait par exemple passer en revue la situation des différents pays pour déterminer les

domaines dans lesquels des améliorations seraient possibles et faire des recommandations sur des questions telles que la protection physique, la criticité et la radioprotection. Elle pourrait ensuite publier ces informations dans des documents relatifs à la sûreté couvrant l'assurance de la qualité et les normes de sûreté. Elle pourrait aussi jouer un rôle accru en fournissant des conseils et en supervisant l'application des recommandations internationales qui pourraient être élaborées.

En ce qui concerne l'industrie, l'Agence pourrait promouvoir les échanges entre pays pour faciliter les travaux de recherche-développement sur le combustible à oxydes mixtes. Les deux facteurs qui freinent actuellement son emploi sont, d'une part, la capacité limitée de fabrication et, d'autre part, le fait qu'il ne représente qu'une proportion relativement faible du combustible chargé dans le cœur des réacteurs. On peut en effet pour le moment en introduire jusqu'à 30% sans modifier la configuration du cœur. Mais les études montrent que, si l'on veut se rapprocher d'un chargement à 100%, il faudra modifier cette configuration et accroître le nombre de barres de commande.

L'Agence continuera de surveiller les quantités de plutonium pour réduire autant que possible les incertitudes dans la projection et l'évaluation des stocks futurs. D'après les prévisions, les quantités de plutonium provenant du retraitement civil augmenteront jusqu'à l'an 2000 et diminueront ensuite. Il est très difficile de quantifier cette augmentation et de dire quand elle se produira. Tout dépend des hypothèses relatives aux taux de retraitement, aux capacités et aux dates auxquelles seront disponibles les usines de fabrication de combustible à oxydes mixtes. Si l'on ne construit pas d'autres usines que celles qui sont prévues actuellement, il faudra une vingtaine d'années pour réabsorber dans le cycle du combustible les quantités de plutonium accumulées.

Etant donné l'augmentation de l'offre de plutonium, et la possibilité de l'employer dans des armes, on s'intéresse de plus en plus à la mise en place d'un système international qui permettrait de gérer et de contrôler de façon sûre les stocks civils. Un tel système, dans lequel l'AIEA jouerait un rôle important, pourrait fort bien donner au public l'assurance que les stocks de plutonium sont contrôlés comme il se doit et manipulés de façon sûre.

A l'intérieur de
l'usine de Sellafield
au Royaume-Uni, où
du combustible irradié
est envoyé
pour être retraité.
(Crédit: BNFL)

