

# Cycles du combustible nucléaire: nécessité d'une adaptation

*L'évolution de la situation politique et économique a rouvert le débat mondial sur le retraitement du combustible nucléaire et les options en matière de recyclage*

par  
B.A. Semenov  
et N. Oi

Dans les années 70, le nucléaire faisait partie des sources d'énergie qui se développaient le plus rapidement, et il n'a cessé depuis lors d'apporter une contribution importante à l'approvisionnement en électricité de nombreux pays. Sa part dans la production mondiale d'électricité est aujourd'hui légèrement supérieure à 17%, et dépasse 25% dans 15 pays.

Dans les années 90, l'électronucléaire occupera encore partout une place importante, mais son taux de progression s'est ralenti et devrait rester modeste jusqu'à la fin de la décennie. Dans le même temps, on s'attend à une augmentation considérable de l'offre d'uranium et de plutonium — sources de combustible des centrales nucléaires — et à des excédents croissants.

Ces changements ont eu des répercussions sur les stratégies et les approches des industries présentes sur le marché du nucléaire. Il en a été de même des conditions économiques, environnementales et politiques influant sur le développement de l'énergie et de l'électricité. Au niveau international, le débat porte de plus en plus sur un certain nombre d'opérations et de procédés industriels associés à ce que l'on appelle communément le «cycle du combustible» nucléaire (voir l'encadré). Ces activités comprennent l'extraction du minerai d'uranium; l'enrichissement de l'uranium et la fabrication du combustible; le retraitement et le recyclage du combustible irradié (c'est-à-dire épuisé); et la gestion des déchets nucléaires et du combustible irradié.

Etant donné le changement des conditions qui déterminent le développement du nucléaire, il est utile d'examiner comment ces activités s'adaptent à la nouvelle situation. Le présent article passe briève-

ment en revue les faits nouveaux et décrit un certain nombre d'activités internationales entreprises par l'AIEA dans le cadre de son programme relatif au cycle du combustible nucléaire.

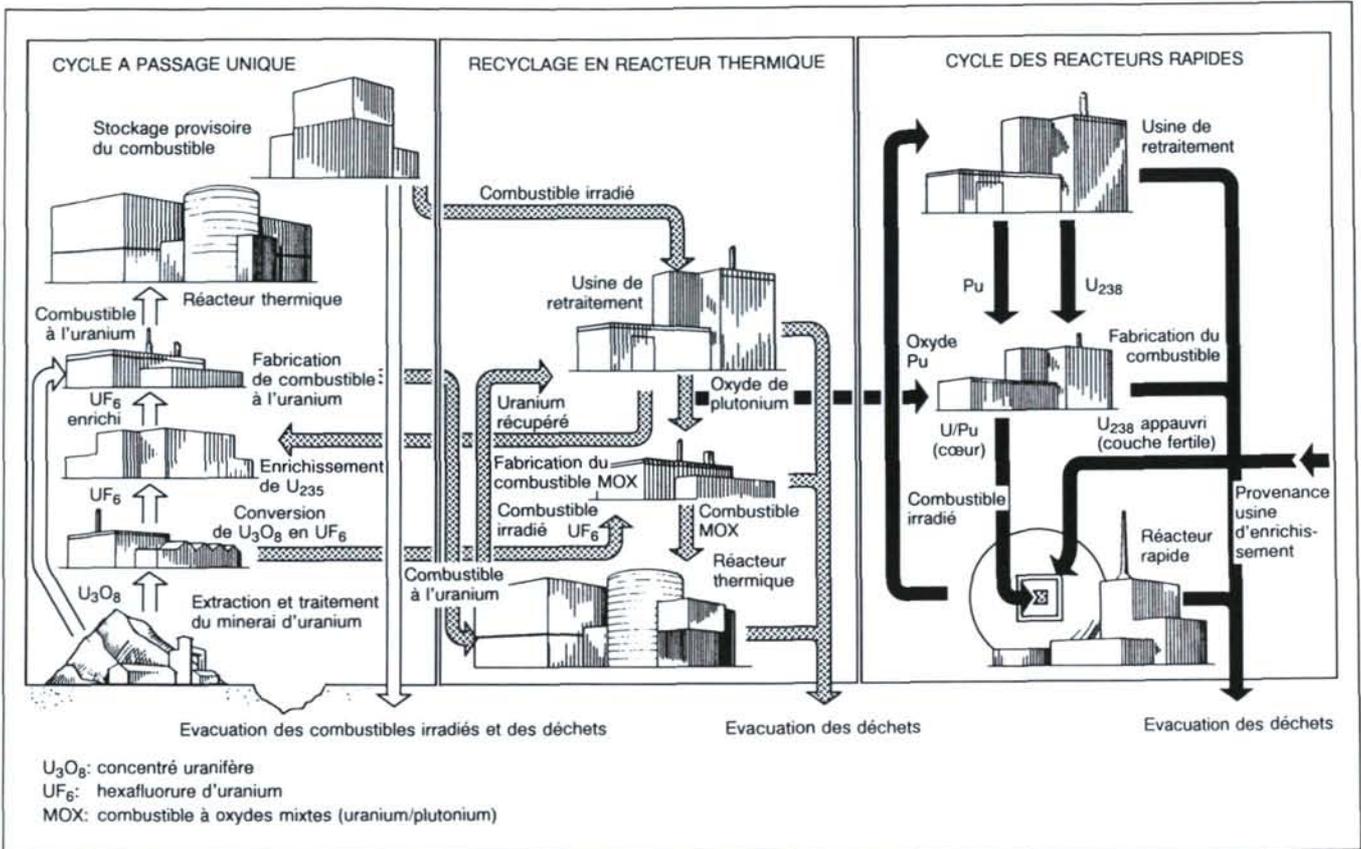
## Evolution du cycle du combustible nucléaire

Le concept de cycle du combustible nucléaire n'est pas nouveau, puisqu'il remonte pratiquement à la naissance de la fission nucléaire contrôlée en vue de produire de l'électricité. Du temps des premières centrales nucléaires, on considérait généralement comme allant de soi que le combustible provenant des réacteurs de puissance serait retraité et que l'uranium et le plutonium récupérés seraient recyclés.

A cette époque, le minerai d'uranium était une marchandise rare et coûteuse, dont on pensait que les ressources économiquement disponibles ne suffiraient pas à satisfaire les besoins liés à la généralisation de l'énergie nucléaire. Il semblait donc indispensable d'extraire tout le contenu énergétique potentiel de l'uranium, sans se limiter à l'uranium 235. Une exploitation aussi totale des ressources en uranium suppose le retraitement du combustible irradié et l'extraction du plutonium pour le brûler dans des réacteurs «rapides» spécialement conçus. Cette approche est devenue plus séduisante avec l'apparition de réacteurs surgénérateurs rapides, capables de produire plus de combustible qu'ils n'en consommaient. Ces considérations expliquent que beaucoup de pays, dans les années 60, aient accordé un degré élevé de priorité à la mise au point de réacteurs rapides, dont on prévoyait qu'ils seraient largement déployés dans les années 80.

Jusqu'au début des années 70, on se représentait donc le cycle du combustible nucléaire comme une succession ordonnée d'opérations, comprenant l'extraction et le traitement du minerai d'uranium, sa conversion, l'enrichissement de l'uranium, la fabrication du combustible et la production d'électricité, le retraitement, le recyclage du plutonium et de

M. Semenov est directeur général adjoint et chef du Département de l'énergie et de la sûreté nucléaires de l'AIEA. M. Oi est chef de la Section des matières et du combustible nucléaires de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la gestion des déchets de ce département.



### Cycles du combustible nucléaire

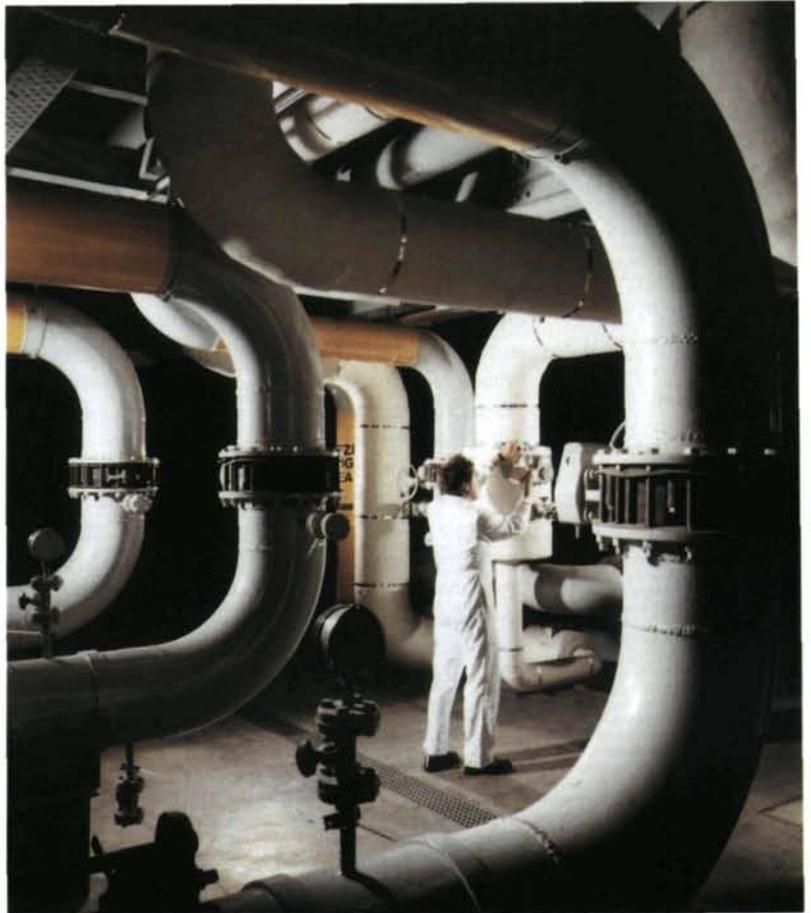
On distingue généralement trois types de cycle du combustible pour la production d'énergie nucléaire, selon que le combustible est recyclé et selon le type de réacteur utilisé pour produire de l'électricité.

- **Le cycle à passage unique**, dans lequel le combustible irradié n'est pas retraité mais stocké jusqu'à son évacuation comme déchet.

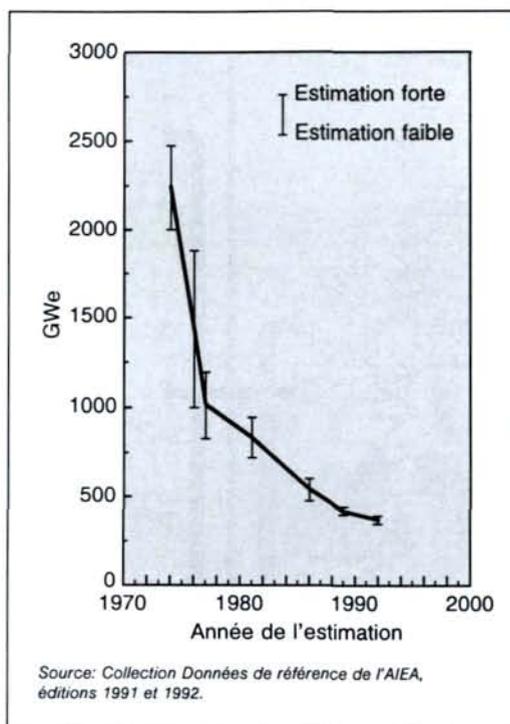
- **Le cycle des réacteurs thermiques**, dans lequel le combustible irradié est retraité et l'uranium et le plutonium sont séparés des produits de fission. L'uranium et le plutonium peuvent tous deux être recyclés dans de nouveaux éléments combustibles. Il est également possible de ne recycler que l'uranium et de stocker le plutonium, et inversement.

- **Le cycle des surgénérateurs rapides**, dans lequel le combustible irradié est là aussi retraité et l'uranium et le plutonium sont utilisés dans de nouveaux éléments combustibles. Mais ils sont cette fois recyclés dans des surgénérateurs rapides, où le combustible à l'uranium et au plutonium, dans le centre du cœur, est entouré d'une couche fertile d'uranium appauvri (uranium dans lequel la plupart des atomes d'uranium 235 ont été extraits pendant l'enrichissement), ou dans des réacteurs à consommation. Cet uranium appauvri contient surtout des atomes d'uranium 238, dont certains sont transformés en plutonium pendant l'irradiation. Correctement exploités, les surgénérateurs rapides peuvent donc produire un peu plus de combustible qu'ils n'en consomment, d'où leur nom.

Intérieur d'une usine d'enrichissement de l'uranium par centrifugation. (Crédit: BNFL)



**Puissance nucléaire installée dans les pays à économie de marché en l'an 2000: projections**



l'uranium dans des réacteurs rapides, et l'évacuation définitive des déchets provenant des usines de retraitement. Pour l'essentiel, la fermeture du cycle du combustible signifiait l'utilisation efficace du plutonium produit dans des réacteurs thermiques pour alimenter des surgénérateurs rapides.

### Les causes de l'évolution

La situation a considérablement changé au cours des 20 dernières années. Aucun des cycles fermés du combustible dont on prévoyait au départ qu'ils seraient opérationnels dans les années 80 n'existe aujourd'hui. Leur démonstration a été faite en France, au Japon, au Royaume-Uni et en Russie à l'échelle expérimentale, mais elle n'a pas encore eu lieu à l'échelle commerciale.

Il y a aujourd'hui deux écoles. La première considère que le plutonium, en tant que source d'énergie, n'a pas de valeur économique et que le combustible irradié devrait être évacué dans des conditions de sûreté (option «sans retraitement»). La deuxième s'en tient essentiellement au cycle du combustible nucléaire traditionnel (cycle fermé). Les différences d'opinions résultent principalement des prévisions concernant l'expansion de l'électricité d'origine nucléaire et la disponibilité de ressources économiques en uranium, encore que des considérations politiques et écologiques entrent aussi en jeu.

On notera que le plutonium peut être utilisé dans des réacteurs rapides pour produire de l'énergie plus efficacement et que, de plus, la quantité d'éléments transplutoniens inhérents à l'option sans retraitement

peut être réduite. Dans l'option «cycle fermé», la combustion du plutonium sous la forme de combustible à oxydes mixtes dans des réacteurs à eau ordinaire n'est qu'une solution temporaire, dans l'attente que des réacteurs rapides soient disponibles.

### Production d'énergie nucléaire et approvisionnement en combustibles: projections

La production d'électricité nucléaire en l'an 2000 a fait l'objet de projections qui, au cours des 20 dernières années, ont été considérablement modifiées. En 1980, lors de la réalisation des études menées dans le cadre de l'évaluation internationale du cycle du combustible nucléaire, on prévoyait que cette production se situerait entre 850 et 1200 gigawatts électriques (GWe) dans les pays à économie de marché, alors que l'estimation la plus récente de l'AIEA donne une fourchette de 372 à 382 GWe (voir le graphique). A la fin de 1992, la puissance nucléaire mondiale installée était de 330 GWe.

En ce qui concerne le marché de l'uranium, on peut suivre l'évolution de la situation grâce au rapport «Uranium: Ressources, production et demande», familièrement appelé «Livre rouge», que publient conjointement l'AIEA et l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) depuis 1965. Le Livre rouge continue, depuis son édition de 1977, de définir les ressources raisonnablement assurées comme celles qui sont récupérables à un coût inférieur ou égal à 80 dollars des Etats-Unis par kilogramme d'uranium (\$/kg U), bien que la valeur réelle du dollar ait diminué depuis lors de 50%.

Pendant l'évaluation internationale faite en 1980, les ressources raisonnablement assurées récupérables à moins de \$80/kg U s'élevaient à 1 850 000 tonnes d'uranium. En 1991, elles étaient estimées à 1,5 million de tonnes (voir le graphique). En négligeant quelques détails mineurs, on peut considérer que les ressources estimées sont, *grosso modo*, restées au même niveau depuis 1975. Elles correspondent à peu près aux besoins de 30 années, sur la base de la demande prévue en l'an 2000.

Le prix de l'uranium sur le marché au comptant n'a cessé de baisser depuis 1980, tombant de \$40/livre à son niveau actuel de moins de \$8/livre. De nombreux producteurs attendent sa remontée, censée intervenir entre 1995 et 2000. Etant donné le faible niveau des prix actuels, la production d'uranium des pays occidentaux est tombée à 27 000 tonnes en 1991, chiffre inférieur aux besoins mondiaux des réacteurs nucléaires (44 500 tonnes). Le déficit de production a été compensé par prélèvement sur les matières détenues en stock, et notamment par des importations en provenance de la Chine et de l'ex-Union soviétique (voir dans ce numéro l'article consacré à la situation du marché de l'uranium).

Selon les tenants du cycle du combustible fermé, le plutonium devait progressivement se substituer à l'uranium enrichi en tant que combustible nucléaire primaire, mais les choses ne se sont pas passées ainsi, et l'on est revenu sur l'idée selon laquelle la valeur de l'uranium et du plutonium provenant du retraitement serait supérieure au coût du retraitement.

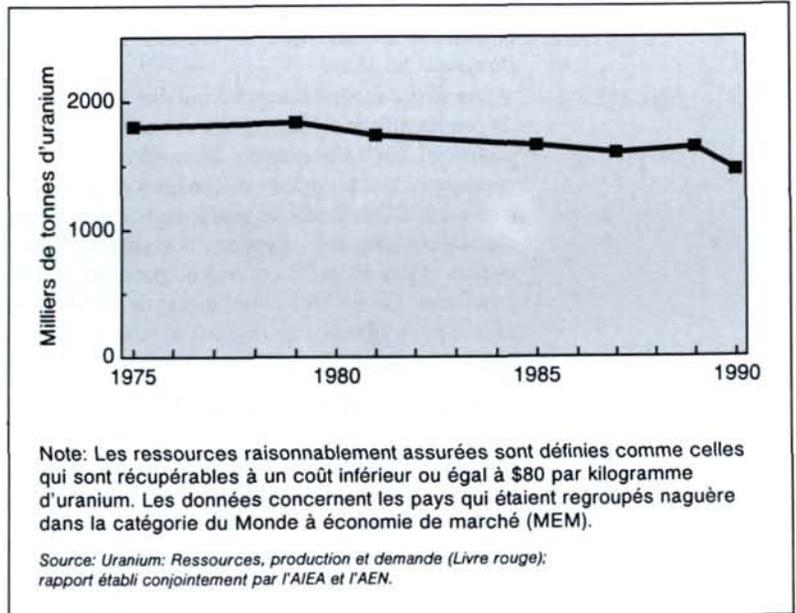
### Le cycle du combustible nucléaire et l'avenir des options

Actuellement, les deux options sont vivement soutenues par leurs défenseurs. Il semble que l'option sans retraitement s'appuie à la fois sur des prévisions pessimistes quant à l'avenir de l'énergie nucléaire et sur des prévisions optimistes quant à l'accessibilité de ressources économiques en uranium. A notre avis, toutefois, elle pose en soi un problème. Le combustible irradié, ou le plutonium vitrifié mélangé à des produits de fission, que l'on évacue dans des dépôts géologiques, formera dans des milliers d'années des mines de plutonium potentielles, du fait que la plupart des produits de fission se désintègreront plus vite que le plutonium.

Les perspectives à long terme de l'énergie nucléaire, en revanche, militent en faveur de l'option «cycle fermé». On estime que la population mondiale, qui est actuellement de 5,5 milliards d'individus, va augmenter de 100 millions d'habitants par an et qu'en 2010 la consommation d'énergie électrique aura pratiquement quadruplé. On ne pourra faire face à un tel accroissement sans mettre en danger l'environnement, sauf si l'on fait davantage appel au nucléaire. Il faut aussi s'attendre à une intensification de la concurrence commerciale pour le traitement et la fabrication de combustible MOX au cours des 20 prochaines années, ce qui entraînera de fortes baisses des prix. Avec l'escalade inévitable des prix de l'uranium, il sera économiquement plus justifié d'utiliser du plutonium pour alimenter des réacteurs rapides et par conséquent d'avoir des cycles fermés.

Néanmoins, l'option cycle fermé s'accompagne d'un certain nombre de difficultés, dont l'une des plus importantes est peut-être due aux politiques et règlements nationaux régissant les autorisations et leur effet sur les aspects économiques des futurs réacteurs rapides. Il est hors de doute que l'on adaptera à ces derniers les dispositions réglementaires détaillées mises au point pendant des dizaines d'années pour les réacteurs à eau actuels, ce qui entraînera de longs délais et de lourdes charges économiques.

Quelques modifications des deux options fondamentales du cycle du combustible peuvent être envisagées. On pourrait par exemple passer à des taux de combustion très élevés dans les réacteurs à eau ordinaire actuels pour produire du plutonium de composition isotopique plus facile à vérifier



et à contrôler. On pourrait aussi s'intéresser de nouveau au cycle thorium/uranium, qui n'a pas les inconvénients associés au plutonium.

L'évolution future du cycle du combustible nucléaire différera sans doute selon les pays. Ceux qui peuvent se permettre d'exploiter des ressources naturelles coûteuses décideront peut-être, pour des raisons politiques ou autres, de réduire leurs programmes nucléo-énergétiques et d'adopter l'option sans retraitement. Les autres développeront sans doute leurs programmes nucléaires et s'efforceront d'appliquer l'option cycle fermé. Il faudra peut-être 20 années encore avant que l'on puisse avoir une idée de l'allure de la tendance.

### Estimation des ressources raisonnablement assurées d'uranium depuis 1975

### Coopération internationale et programmes de l'AIEA

Les programmes de l'AIEA dans le domaine du cycle du combustible nucléaire s'adaptent aux circonstances changeantes et imprévisibles qui régissent l'évolution de l'énergie nucléaire. Ils sont conçus fondamentalement pour aider les pays à améliorer la sûreté, la fiabilité et la viabilité économique de leur cycle du combustible nucléaire tout en limitant au minimum les effets sur l'environnement et sur la santé.

Ces programmes ont toujours fait partie intégrante des activités de l'Agence. Bien que les ressources qui leur sont allouées ne représentent qu'une faible proportion du budget global de cette dernière, les pays ont beaucoup de réalisations à leur actif. Les activités portent sur quatre domaines principaux: ressources en uranium; performance et technologie du combustible pour réacteurs; gestion du combustible irradié; évaluation du cycle du combustible nucléaire. En outre, des travaux impor-

tants sont menés dans le cadre de sous-programmes portant sur les matériaux de structure utilisés dans l'industrie nucléaire.

Au fil des années, toutes les installations du cycle du combustible nucléaire ont été aux prises avec des problèmes liés à l'irradiation des matériaux, dont la dégradation des propriétés mécaniques et physiques a entraîné la défaillance de composants et des temps d'arrêt coûteux des réacteurs. La corrosion des métaux et des alliages continue de poser de graves problèmes. Les problèmes techniques de ce type sont examinés au niveau international avec la participation et l'appui de l'Agence.

**Ressources en uranium.** Comme on l'a vu, le prix de l'uranium joue un rôle important, car il influe directement sur l'incitation économique à utiliser des réacteurs rapides et du plutonium. Il est indispensable pour les planificateurs et les décideurs de disposer d'une base de données complète et fiable sur les ressources et l'on considère généralement que le Livre rouge mentionné remplit cette fonction. Il est devenu plus précieux encore depuis qu'il fournit des données jusqu'ici non disponibles sur les anciennes républiques de l'Union soviétique et d'autres pays. On s'attache actuellement à obtenir de ces pays des renseignements correspondant aux exigences des bases de données existantes et aux informations dont on a besoin.

L'Agence est depuis de nombreuses années un centre d'information sur la géologie et la prospection de l'uranium, l'extraction et le traitement du minerai, et l'analyse de l'offre et de la demande. Elle s'intéresse aussi actuellement à la fermeture des installations d'extraction et de traitement du minerai d'uranium du point de vue de la sûreté, de la protection de l'environnement, de l'économie et de la délivrance d'autorisations et apporte son appui aux projets de coopération technique dans les pays demandant une assistance pour développer leurs programmes nucléaires pacifiques et leurs activités du cycle du combustible.

**Performance et technologie du combustible.** La gaine du combustible est la première barrière empêchant le rejet dans l'environnement des produits de fission d'un réacteur. Après une «épidémie» de défaillances, dans les années 70, le combustible des réacteurs à eau actuels se comporte de façon tout à fait satisfaisante et il y a très peu de ruptures de gaines. Les demandes continues d'amélioration de la performance du combustible risquent toutefois d'en compromettre la fiabilité, notamment parce que la tentation est grande d'accroître le taux de combustion afin de réduire la quantité de combustible irradié déchargé. Les producteurs d'électricité aspirent toujours aussi à un «taux de défaillance nul» afin de conserver la pureté de leur centrale. En conséquence, les vendeurs, les producteurs d'électricité et les autorités compétentes en matière d'autorisation suivent de très près la performance du combustible et souhaitent échanger des informations, même si la

technologie du combustible est considérée comme éprouvée, en particulier dans les pays occidentaux.

Un groupe de travail international sur la performance et la technologie du combustible nucléaire, créé en 1977, continue d'orienter les travaux de l'AIEA dans le domaine de la conception, de la fabrication et de la performance du combustible. Il comprend maintenant les représentants de 25 Etats Membres et de trois organisations internationales et constitue le point de contact entre pays développés et pays en développement.

**Gestion du combustible irradié.** On estime que plus de 100 000 tonnes de combustible irradié provenant de réacteurs de puissance se trouveront en l'an 2000 dans des installations de stockage du monde entier. Moins de la moitié des quantités produites annuellement seront retraitées d'ici là et le reste sera stocké pour une longue période avant d'être évacué définitivement dans des dépôts géologiques ou retraité. Etant donné le délai de mise en service des réacteurs rapides, les pays ayant une capacité de retraitement stockent eux aussi de grandes quantités de combustible irradié. Le stockage à long terme prend donc de plus en plus d'importance. Il s'effectue sous eau ou bien à sec dans des fûts, des voûtes ou des conteneurs. Bien que le stockage du combustible irradié n'ait posé jusqu'à présent aucun problème sérieux de sûreté, il est admis que les problèmes technologiques, économiques et réglementaires qui lui sont associés continuent d'être un domaine où la coopération internationale est utile. (*Voir plus loin l'article sur ce sujet.*)

En 1984, l'AIEA a créé un groupe consultatif sur la gestion du combustible irradié qui se réunit tous les deux ans pour fournir des conseils techniques sur le programme de l'Agence et qui joue le rôle de centre d'échange d'informations sur la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, notamment le stockage du combustible irradié. Il se compose actuellement de représentants de 12 pays et de l'AEN.

L'une de ses activités les plus importantes est l'élaboration de normes internationales pour le stockage du combustible irradié. L'AIEA est en train de préparer des guides de sûreté sur la conception et l'exploitation d'installations de stockage du combustible irradié, ainsi qu'un document sur les pratiques de sûreté.

Elle est également en train d'élaborer un programme consultatif sur la gestion du combustible irradié, qui traite des questions liées aux réacteurs de puissance et aux réacteurs de recherche, en vue de fournir des conseils et une formation, principalement à des spécialistes de pays en développement.

**Evaluation du cycle du combustible nucléaire.** Un certain nombre d'activités de l'AIEA portent sur l'ensemble du cycle du combustible nucléaire. C'est ainsi qu'une étude est consacrée aux incidences des installations de ce cycle sur l'environnement et

sur la santé dans les conditions de fonctionnement normal et dans les conditions d'accidents. Cette étude fait partie d'une évaluation internationale appelée «DECADES», destinée à comparer les effets sur la santé et sur l'environnement de l'énergie nucléaire et d'autres systèmes énergétiques.

Une autre activité importante concerne le plutonium. On estime que 86 tonnes de plutonium civil séparé se sont accumulées dans le monde et la quantité devrait continuer de s'accroître jusqu'à la fin du siècle. Ce stock résulte du déséquilibre entre la production et l'utilisation. On envisage de confier une nouvelle tâche importante à l'Agence en matière de gestion du plutonium au niveau international, avec les activités qui s'y rattachent. Elle pourrait s'occuper par exemple du plutonium du secteur militaire récupéré des ogives nucléaires démantelées.

### Consolidation de la coopération mondiale

Les années qui viennent seront riches en événements qui auront des répercussions sur l'énergie nucléaire et son cycle du combustible, et ne manqueront pas d'interpeller la communauté internationale. A mesure qu'elles se révéleront, les politiques et les approches des différents pays continueront d'influer sur l'ampleur et l'orientation

de la coopération mondiale et, par extension, sur les travaux de l'AIEA dans divers domaines.

Les programmes que l'Agence consacre aux activités du cycle du combustible nucléaire font partie intégrante de ses services internationaux, et elle continuera de les adapter à l'évolution de la situation et des intérêts de ses Etats Membres. En tant qu'instruments de la coopération mondiale, ils contribueront à renforcer la sûreté, la fiabilité et la viabilité économique des activités nationales du cycle du combustible nucléaire et à limiter au minimum leurs incidences sur l'environnement et la santé.

Vue aérienne de l'usine de retraitement UP-3 à la Hague, inaugurée au début de 1992. Ci-dessous: la piscine de stockage intermédiaire d'UP-3. (Crédit: Cogema)

