

# Les systèmes nucléo-énergétiques de l'avenir: production d'électricité et incinération des déchets

*En couplant des accélérateurs à des réacteurs, on espère produire de l'électricité tout en incinérant le plutonium et les déchets radioactifs*

par Viktor Arkhipov

L'un des principaux problèmes que soulève l'utilisation de l'énergie nucléaire est constitué par les déchets de haute activité qu'engendre la production d'électricité. Il convient de le résoudre de manière sûre et efficace. Bien qu'il existe des solutions techniques, comme celle des dépôts en formations géologiques profondes, l'évolution des méthodes d'évacuation des déchets radioactifs a été influencée et, bien souvent, retardée par l'idée que le public se faisait de la sûreté de la technologie. Ceci s'explique en premier lieu par la longévité de nombreux radio-isotopes produits durant la fission: leur période radioactive varie en effet de 100 000 ans à 1 million d'années. Ces problèmes de perception pourraient cependant être considérablement réduits s'il existait un moyen d'incinérer ou de détruire les déchets radioactifs à longue période les plus toxiques à mesure que l'on produit de l'énergie.

Une nouvelle option technologique, ou plutôt une amélioration viable apportée à des idées antérieures, a été présentée récemment. Elle associe des techniques propres aux accélérateurs et aux réacteurs à fission en un système permettant de produire de l'électricité efficacement par fission nucléaire et/ou de transmuter les déchets radioactifs à longue période. Dans sa forme la plus simple, le concept de production d'énergie par accélérateur fait appel à des neutrons produits par un faisceau de protons de haute énergie pour activer un assemblage fertile contenant du combustible fissile et des déchets radioactifs. Cet assemblage fertile ressemble à un réacteur dans la mesure où c'est la fission qui fournit de l'énergie. Contrairement aux réacteurs classiques, toutefois, il est sous-critique et ne peut pas entretenir une réaction en chaîne sans la présence d'un accélérateur. Le système

pourrait utiliser de l'uranium, du plutonium ou du thorium comme combustible.

Tout en détruisant les déchets de haute activité, un système piloté par un accélérateur (SPA) contribuerait à satisfaire les besoins d'énergie en produisant de l'électricité, forme d'énergie la plus commode et la plus souple. La demande pour toutes les sources d'énergie va augmenter au cours des deux prochaines décennies, ne serait-ce que pour répondre aux besoins de la population mondiale qui, selon les estimations de l'Organisation des Nations Unies, devrait atteindre 8,5 milliards d'habitants en 2025.

---

## Transmutation des déchets radioactifs

La gestion écologiquement sûre des déchets radioactifs est une question importante sur laquelle se penchent tous les pays dotés d'une industrie nucléaire. Dans de nombreux pays, elle constitue désormais une grave question politique qui préoccupe vivement l'opinion publique.

Selon le concept classique du cycle du combustible nucléaire fermé, seule la transmutation (incinération) du plutonium et de l'uranium recyclé était envisagée, tandis que les actinides mineurs (comme le neptunium, l'américium et le curium) étaient destinés à être évacués dans des formations géologiques profondes. Avec les années cependant, une nouvelle idée a commencé à germer: si l'on réduisait la quantité d'actinides, les exigences relatives aux dépôts définitifs s'assoupliraient et le coût de ces dépôts s'en trouverait diminué.

Le recours à la fission pour réaliser la transmutation neutronique des actinides mineurs à longue période — c'est-à-dire produire de l'énergie tout en transformant simultanément les actinides en nucléides à période plus courte — fait l'objet d'études techniques. Il est également proposé de recourir à la transmutation neutronique de certains produits de fission à longue période.

---

M. Arkhipov est consultant auprès de la Section du développement de la technologie électronucléaire, Division de l'énergie d'origine nucléaire et du cycle du combustible de l'AIEA.

Plusieurs possibilités de transmuter des nucléides à longue période par des réactions nucléaires ont été suggérées. Au départ, la meilleure solution semblait consister à utiliser des réacteurs nucléaires mais, depuis quelque temps, les SPA, qui paraissent prometteurs, suscitent un regain d'intérêt.

Ce regain d'intérêt est lié de près à la question du devenir des excédents de plutonium accumulés dans les arsenaux d'ogives nucléaires et dans les stocks beaucoup plus importants et sans cesse croissants de combustible usé provenant des activités nucléaires commerciales. De sérieuses préoccupations politiques ont été exprimées quant à un usage abusif du plutonium et au rejet de cette matière très toxique dans l'environnement. Parmi les nombreuses formules envisagées pour se défaire de ce plutonium, il est question notamment de l'incinérer grâce à la technologie des SPA. Un tel système produirait de grandes quantités d'électricité tout en détruisant le plutonium, ce qui semble beaucoup plus judicieux que d'entreposer ce dernier pendant de nombreux millénaires.

Le concept de SPA pourrait également être utilisé pour incinérer simultanément les produits de fission et les actinides à longue période qui se trouvent dans les déchets des réacteurs de puissance commerciaux actuels. Le but visé serait de détruire les isotopes à longue période qui, en raison de leur mobilité, contribueraient le plus aux doses de rayonnement dues à un dépôt, à savoir le technétium 99, l'iode 129 et le césium 135. Ces trois isotopes représentent environ 5 % en poids de l'ensemble des produits de fission engendrés lors de la production d'électricité et contribuent le plus aux risques éventuels à long terme que pose l'évacuation des déchets dans des formations géologiques. Si la destruction de ces trois isotopes faisait partie intégrante du cycle du combustible, les autres déchets contenant des produits de fission stables et à courte période pourraient être confinés dans des stockages artificiels, éventuellement sur le site même où ils ont été produits.

Pour brûler le maximum de produits de fission, il faut procéder sur place. En optimisant l'assemblage cible/couverture piloté par un accélérateur pour incinérer les déchets, il est possible de réduire considérablement leur volume et leur période radioactive, ce qui simplifie les exigences relatives au stockage de longue durée et à l'évacuation. Même si ce système a pour fonction principale d'incinérer les déchets radioactifs, il devrait pouvoir produire suffisamment d'électricité pour couvrir les dépenses en capital et les coûts d'exploitation de l'installation.

Les objectifs sont certes louables, mais il ne faut pas oublier que la technique nécessite encore beaucoup de recherche-développement. La faisabilité technique de la transmutation, et en particulier sa viabilité économique et radiologique, reste à prouver. En conséquence, il importera de peser soigneusement les avantages et les inconvénients

de la séparation et de la transmutation des déchets radioactifs.

### Associer la production d'énergie et la transmutation

L'idée d'utiliser des accélérateurs pour des applications nucléaires n'est pas nouvelle et avait été proposée dès la fin des années 40 par E. Lawrence, l'inventeur du cyclotron. A Livermore, dans les années 50, c'est lui qui favorisa le développement d'un accélérateur d'essai de matériaux pour créer des flux intenses de neutrons dans le but de produire du plutonium. Au Laboratoire de Chalk River, au Canada, on se mit à étudier de très près les systèmes basés sur des accélérateurs pour produire le combustible nucléaire destiné aux réacteurs à eau lourde. Les scientifiques du Laboratoire national de Brookhaven encouragèrent aussi activement les solutions fondées sur des accélérateurs à la fin des années 70 et au début des années 80. Depuis cinq ans, les scientifiques du Laboratoire national de Los Alamos réévaluent les techniques basées sur les accélérateurs à la lumière des progrès techniques actuels et des perspectives énergétiques mondiales.

Tout récemment, M. Carlo Rubbia, prix Nobel et ancien directeur général du Centre européen de recherche nucléaire (CERN), a proposé et continue de promouvoir activement un SPA de production d'énergie basé sur le cycle thorium-uranium.

Il existe deux types d'accélérateurs capables de piloter un tel système à environ 1 GeV avec des courants moyens compris entre 10 et 100 mA. La première solution est de faire appel à un accélérateur linéaire. La seconde est d'avoir recours à un accélérateur circulaire, qui a l'avantage d'être plus compact. Tous deux peuvent produire l'énergie voulue, mais ils demandent encore des améliorations techniques avant de pouvoir atteindre les intensités de faisceaux nécessaires. Le cyclotron est limité à des courants de 10 à 15 mA à cause de la difficulté de bien confiner le faisceau, tandis que l'accélérateur linéaire devrait sans doute être en mesure de produire un courant de faisceau de 100 à 200 mA. Les accélérateurs linéaires produisent déjà de tels courants en mode pulsé, mais doivent encore faire l'objet d'importantes améliorations techniques avant de pouvoir fonctionner de façon quasi continue aux courants les plus élevés. Un système fournissant 15 mA de protons et 800 MeV peut piloter un assemblage fertile qui produit 200 MWe. A ce niveau de puissance, on pourrait faire appel à un accélérateur circulaire. Un accélérateur linéaire à courant élevé pourrait piloter un système énergétique de 1 200 MWe. Dans un cas comme dans l'autre, il est prévu qu'environ 15 à 20 % de toute l'électricité produite servent à piloter l'accélérateur.

Plusieurs pays et organisations internationales examinent actuellement diverses options techniques pour la transmutation et la production d'énergie

faisant appel aux SPA. Un certain nombre de types de SPA sont à l'étude au Japon (projet OMEGA — Options visant à tirer meilleur profit des actinides); aux Laboratoires nationaux de Los Alamos et de Brookhaven, aux Etats-Unis; au Commissariat à l'énergie atomique (CEA), en France; en Fédération de Russie; au CERN; à l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et à la Commission européenne (CE).

Les concepts de SPA peuvent être classés d'après leurs caractéristiques physiques et leurs buts finals. Le classement est basé sur le spectre d'énergie neutronique, la forme du combustible (solide, liquide), le type de cycle du combustible et de réfrigérant/modérateur, ainsi que sur les objectifs du système. Les SPA, tout comme les réacteurs, peuvent être conçus pour fonctionner selon deux modes différents de spectres neutroniques: les neutrons rapides ou les neutrons thermiques. Le CERN tente aussi d'élaborer un système qui utiliserait les résonances des sections efficaces de neutrons dans ce qui pourrait être classé comme un mode de «neutrons de résonance». Le système à neutrons rapides et le système à neutrons thermiques sont envisagés pour les combustibles solides et liquides. Un combustible quasi liquide a même été proposé à partir du concept de combustible à particules (lit de boulets) mis au point à Brookhaven.

Comme il a été mentionné plus haut, l'objectif de certains SPA est de transmuter des composants existants du combustible usé provenant de réacteurs nucléaires, surtout le plutonium et les actinides mineurs, avec ou sans production d'énergie. D'autres systèmes sont conçus pour utiliser le cycle du combustible à thorium en vue de produire de l'énergie. La plupart des concepts sont basés sur des accélérateurs linéaires. Toutefois, le groupe du CERN et les chercheurs de Brookhaven proposent d'utiliser un cyclotron à protons.

Le SPA de production d'énergie proposé à Los Alamos comprend un accélérateur linéaire à faisceau de protons de haute énergie, une cible de métal lourd (plomb ou plomb et bismuth) et un combustible liquide. Le combustible liquide est intéressant parce qu'il évite les opérations de fabrication de combustible solide et de gestion des grappes de combustible, tout en permettant d'extraire en permanence une fraction importante des produits de fission en cours d'exploitation. Non seulement réalise-t-on ainsi des économies de combustible plus importantes, mais on détruit en même temps la composante à longue période des produits de fission. La formule des sels fondus a été retenue parce qu'elle fonctionne à de faibles pressions et se caractérise par des structures mécaniques plus simples, de moindres pertes par absorption de neutrons et un inventaire plus faible de combustible liquide.

Le SPA nucléaire sous-critique proposé par Carlo Rubbia et ses collègues du CERN est un sys-

tème à neutrons rapides. Les éléments combustibles se présentent sous forme solide et sont constitués d'aiguilles gainées. Le combustible type se compose de thorium et d'uranium 233, mais le système peut aussi fonctionner avec du plutonium (de qualité militaire ou réacteur) et fissionner également des actinides plus lourds comme l'américium et le curium. Un certain nombre des caractéristiques de sûreté passive du concept se fondent sur ses propriétés physiques.

Au Japon, l'Institut japonais de recherches sur l'énergie atomique (JAERI) se penche depuis 20 ans sur les systèmes de transmutation et étudie deux types de concepts: (1) un système comprenant une cible solide et un cœur; (2) un système comportant une cible de sels fondus et un cœur. Le concept d'un réacteur à sels fondus piloté par un accélérateur est à l'étude dans plusieurs universités japonaises. Le JAERI est sur le point de lancer le «Neutron Science Project» dont le but est d'apporter des innovations scientifiques et technologiques au XXI<sup>e</sup> siècle dans les domaines des sciences pures et des techniques nucléaires faisant appel aux neutrons. L'étude des SPA de transmutation et le développement d'un accélérateur intense à protons constituent des axes importants du projet.

Au CEA, en France, différents laboratoires se penchent depuis quelques années sur plusieurs aspects de la technologie et de la physique des SPA. En 1995, on a décidé de lancer un programme limité sur la validation expérimentale des principaux éléments liés à un SPA générique.

En Fédération de Russie, plusieurs équipes de centres scientifiques ont travaillé sur des aspects technologiques et physiques des SPA. Divers concepts prévoyant des structures et des matériaux différents pour la cible et la couverture sont envisagés. Quelques études sur la séparation et la transmutation, appelées «projets de conversion», sont financées par des institutions internationales, principalement dans le cadre des activités du Centre international des sciences et des technologies.

L'AEN a établi un vaste programme de travail international sur la transmutation et la séparation des produits de fission et des actinides. Le Comité de développement nucléaire de l'AEN a récemment institué un groupe d'experts pour étudier divers systèmes à cette fin. Le Comité des sciences nucléaires de l'AEN administre aussi un certain nombre de projets de coopération couvrant les aspects scientifiques et physiques de différents concepts de transmutation.

La CE coordonne des projets à frais partagés de ses Etats membres et entreprend des études sur les actinides mineurs, les combustibles et la séparation à l'Institut européen des transuraniens où de telles études sont menées depuis 30 ans. Des études sur les combustibles contenant des actinides mineurs ont donné lieu à une série d'expériences d'irradiation, dont certaines sont déjà terminées. Par le biais d'un autre programme, la CE s'intéresse

de près à l'impact des technologies faisant appel à des accélérateurs sur la sûreté de la fission nucléaire. L'un des objectifs du programme est de coordonner les efforts faits en vue de créer une base scientifique et technologique européenne pour les projets de coopération.

---

### Rôle des activités de l'AIEA

A l'AIEA, les activités menées dans ce domaine s'inscrivent dans un programme sur les nouveaux systèmes nucléaires de production d'énergie et de transmutation. L'objectif est d'offrir un cadre mondial pour l'analyse technique et l'examen de programmes, de projets et de sujets relatifs au développement et à l'introduction de l'énergie nucléaire, y compris les SPA. Les activités portent principalement sur la compilation et la diffusion de rapports d'étape et d'informations techniques, ainsi que sur l'appui à la recherche coordonnée. Elles comprennent notamment les éléments suivants:

*Rédaction et publication d'un rapport d'étape sur les SPA.* Ce travail est le résultat des discussions techniques qui ont eu lieu dans le cadre du Programme scientifique spécial sur l'«Utilisation d'accélérateurs de haute énergie pour la transmutation des actinides et la production d'électricité», organisé à Vienne, en 1994, à l'occasion de la Conférence générale de l'AIEA. Le rapport, qui est destiné aux planificateurs, aux décideurs et à d'autres parties s'intéressant au développement des SPA, donne un aperçu général des activités de développement actuelles, des divers concepts en cours d'élaboration et de leur état d'avancement, des tendances caractéristiques des activités de développement et des évaluations des possibilités offertes par un tel système pour produire de l'énergie, incinérer le plutonium et transmuter les déchets radioactifs. Des experts de six pays et de deux organisations internationales ont contribué à ce rapport, qui comprend également des résumés analytiques sur de nombreux aspects de la technologie des SPA.

*Rapport d'étape sur le cycle du combustible basé sur le thorium.* Ce rapport actualisera les informations recueillies au cours des six dernières années et indiquera les domaines où des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires. Il comprendra des contributions de pays et de groupes techniques particuliers et donnera des précisions sur les concepts qu'ils préconisent.

*Programme de recherche coordonnée.* Ce programme est centré sur l'utilisation du cycle du combustible fondé sur le thorium dans les SPA pour incinérer le plutonium et réduire la toxicité à long terme des déchets. Le premier stade couvre les calculs repères et neutroniques des SPA, et l'un de ses objectifs est d'arriver à un consensus sur les méthodes de calcul et les données nucléaires connexes.

*Réunion de Comité technique sur la faisabilité et la justification des concepts hybrides pour la production d'énergie nucléaire et la transmutation.* En septembre 1997, des experts techniques doivent se réunir pour examiner les avantages et les inconvénients des concepts hybrides en fonction de la situation actuelle et de l'orientation future possible de l'énergie nucléaire à travers le monde, et pour proposer des options et faire des recommandations à l'intention des Etats Membres de l'AIEA dans ce domaine.

---

### Enjeux et possibilités

Maintes questions techniques et d'ingénierie restent à explorer et à résoudre avant que les possibilités du concept des SPA puissent être démontrées. Les travaux nécessaires exigeront une coopération internationale accrue en vue de la mise en commun des compétences et des ressources.

Pour de nombreuses raisons, les SPA valent la peine d'être étudiés plus avant. En produisant de l'électricité, ils peuvent contribuer à satisfaire les besoins énergétiques croissants de la planète, tandis qu'en permettant d'incinérer le plutonium et les déchets de haute activité ils peuvent contribuer à la protection de l'environnement et à une gestion sûre des déchets. Certains types de SPA en cours d'élaboration peuvent produire de l'énergie à partir d'un élément abondant — le thorium — dans un assemblage fertile sous-critique sûr qui engendre très peu de déchets nucléaires. Au-delà de ces réalisations, on peut penser que d'autres systèmes permettront un jour d'incinérer le plutonium des ogives nucléaires et le combustible nucléaire usé (y compris ses principaux produits de fission) provenant des centrales nucléaires commerciales.

A l'heure actuelle, un certain nombre d'instituts et de laboratoires scientifiques nationaux et régionaux à travers le monde sont engagés dans des programmes de recherche et de développement au sujet des SPA. Dans ce domaine, les programmes de l'AIEA encouragent, à l'échelle mondiale, l'échange d'informations et la recherche conjointe sur des sujets précis. Les travaux en cours témoignent de l'intérêt accru pour la technologie des SPA en tant que moyen concret de contribuer à la réalisation des objectifs internationaux en matière d'énergie et d'environnement.