C'est grâce à un accélérateur de particules que le plutonium a été produit pour la première fois à Berkeley en 1941.

Les accélérateurs remplaceront-ils les surrégénérateurs ?

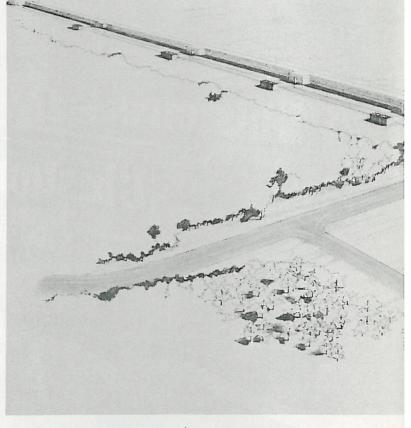
Le plutonium est un combustible nucléaire précieux qui n'existe pas dans la nature. Il est précieux car, si on arrive à le produire en grande quantité, il permettra d'assurer l'avenir de l'énergie nucléaire, mais il est aussi précieux car c'est l'aliment de choix des arsenaux querriers.

Le plutonium 239 s'obtient en ajoutant un neutron à l'uranium 238 qui existe en abondance dans la nature. Les réacteurs nucléaires conventionnels, dont le combustible est actuellement à base d'uranium, produisent en fonctionnant une certaine quantité de plutonium mais qui ne dépasse pas 1 % de l'uranium 238 disponible au départ. Les surrégénérateurs, qui utilisent du plutonium comme combustible, présentent la particularité d'en produire théoriquement plus qu'ils n'en consomment. En principe, ils permettent de convertir jusqu'à 70 % de l'uranium 238 en plutonium.

Cependant, des raisons techniques, économiques et sociales semblent faire de ce miracle un événement improbable ou du moins lointain (1). D'autres voies sont donc explorées pour produire du plutonium. Les technologies les plus prometeuses semblent actuellement celles qui sont liées à l'utilisation des faisceaux de particules accélérées. Différents projets existent aujourd'hui de par le monde et à Brookhaven, près de New York, les caractéristiques d'une usine à plutonium comprenant un accélérateur sont maintenant bien définies.

Des usines à plutonium.

L'accélération des particules est une technique fort répandue. Ainsi, dans le tube image d'un poste de télévision, le faisceau d'électrons qui balaie l'écran fluorescent est produit par un accélérateur rudimentaire. Toutefois, même pour les accélérateurs les plus perfectionnés, le principe de l'accélération reste le même : lorsqu'une particule chargée est soumise à un champ électrique, son énergie cinétique s'accroît proportionnellement à la tension électrique qui produit ce champ. Dans le cas d'un tube de télévision, cette tension est de l'ordre de 20 mille volts si bien que l'énergie des électrons est de 20 mille électronvolts (20 KeV). Les énergies requises pour les applications nucléaires

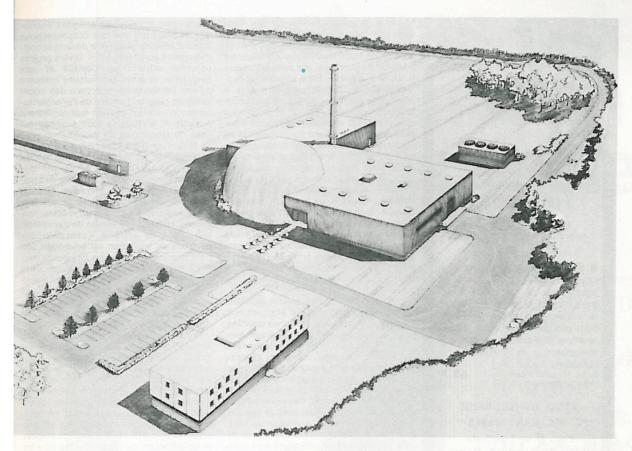


des accélérateurs sont beaucoup plus élevées puisqu'il faut déjà quelques millions d'électronvolts (MeV) pour libérer un neutron d'un noyau. Il faudrait donc appliquer une tension de 100 à 1 000 millions de volts, ce qui ne peut pas être fait en une seule fois. Les accélérateurs de haute énergie comportent donc de nombreuses cavités d'accélération successives disposées le long de la trajectoire du faisceau. Les techniques couramment utilisées procurent des gradients d'accélérations de l'ordre de 1 à 2 MeV par mètre de cavité accélératrice. Dans un accélérateur linéaire, les cavités sont simplement mises bout-à-bout, si bien que la longueur d'un accélérateur linéaire de 1 000 MeV, une énergie courante pour un accélérateur actuel, est d'environ 1 km. Dans un accélérateur circulaire, les particules sont maintenues par des aimants sur une trajectoire fermée, ce qui leur permet de traverser les cavités accélératrices un grand nombre de fois et d'acquérir à chaque passage un peu plus d'énergie. Ce type d'accélérateur peut atteindre des énergies plus élevées, mais en général au détriment de l'intensité du faisceau.

Les accélérateurs permettent de bombarder la matière avec des faisceaux de particules de hautes énergies, capables d'interagir nucléairement. Une première rencontre entre un tel projectile et un noyau-cible produit des particules secondaires, capables de bombarder à leur tour d'autres noyaux, et ainsi de suite. A chaque interaction, le noyau-cible se brise ou est excité, et des neutrons sont émis. C'est le processus de spallation. On a donc potentiellement la source de neutrons nécessaire à la production de plutonium. Pour une cible d'uranium naturel, on obtient ainsi environ 100 neutrons par proton de 1 000 MeV (2).

Une usine de fabrication de plutonium avec un accélérateur comportera principalement les trois parties suivantes : un accélérateur de protons, une cible de spallation dans laquelle les neutrons sont produits et, entourant la cible, un manteau d'uranium dans lequel les neutrons sont absorbés. En bonne approximation, on peut considérer que pratiquement tous les neutrons produits dans la cible aboutissent à engendrer des noyaux de plutonium. Il est alors facile de calculer le bilan énergétique approximatif d'un tel système. D'une part, pour obtenir les neutrons, il faut fournir de l'énergie à l'accélérateur dont le rendement, il faut en tenir compte, est d'au moins 50 %. Compte tenu de ce rendement, on peut dire qu'une énergie d'accélération de 1 000 MeV donne effectivement seulement 50 neutrons. Cela représente donc 20 MeV de coût énergétique par neutron. Comme ce neutron donne un noyau de plutonium, le coût énergétique du noyau de plutonium est de 20 MeV. Mais, en brûlant dans un réacteur, ce noyau de plutonium libérera une

(1) Conseil de l'Europe, Les surrégénérateurs : aspects économiques et sûreté, Audition parlementaire européenne, 18 et 19 décembre 1979. (2) H. Takahashi et al., «Nuclear fuel breeding by using spallation and muon catalysis fusion reactions», Atomkernenergie, 36, 195, novembre 1980.



Cette esquisse représente le projet d'accélérateur-surrégénérateur du laboratoire de Brookhaven aux Etats-Unis. C'est le projet le plus avancé actuellement au monde. L'accélérateur linéaire de protons, dont la longueur est d'environ 1 000 m, produit un faisceau de 300 mA de protons d'une énergie de 1 000 MeV. L'enceinte de confinement, semblable à celle d'un réacteur nucléaire, contient la cible de spallation. Les neutrons engendrés par le faisceau dans la cible sont absorbés dans un manteau d'uranium à fertiliser qui entoure celle-ci. La quantité de plutonium ainsi produite est estimée à 2 500 kg par année. (Dessin extrait du rapport PNL 50838).

énergie de fission d'environ 200 MeV. Le bilan énergétique est donc très favorable.

Cependant, un bilan énergétique positif, quoique nécessaire, n'est pas suffisant pour démontrer l'intérêt d'un système donné par rapport à d'autres. Il faut en outre comparer sa production effective, dans des conditions semblables, à celle

des autres systèmes. De plus, il faut que le système soit réalisable et pour cela le problème majeur sera l'évacuation de la chaleur dégagée par les réactions nucléaires. Les solutions retenues pour évacuer cette chaleur seront semblables, quel que soit le système envisagé, et consisteront à faire circuler un fluide calo-

	énergie dissipée par noyau de plutonium produit (MeV/noyau)	production nette de plutonium (kg Pu/an)
surrégénérateur rapide au plutonium	1 300	200
réacteur à eau légère	900	300
réacteur à eau lourde	500	500
protons de 1 000 MeV sur cible d'uranium naturel	130	2 500

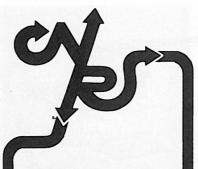
Ce tableau permet la comparaison des réacteurs et des accélérateurs pour la production du plutonium. La production est calculée pour des installations industrielles d'une puissance thermique totale de 3 300 MW (th). Pour les méthodes classiques qui utilisent des réacteurs, les chiffres correspondent à des performances effectives, alors que pour les nouveaux systèmes, surrégénérateur rapide ou accélérateur, ils proviennent d'études détaillées de systèmes complets.

porteur. Un réacteur surrégénérateur utilise du sodium liquide : c'est aussi la solution envisagée pour certains accélérateurs-surrégénérateurs. La difficulté de cette évacuation dépend, entre autres facteurs, de la puissance thermique du système, aussi les systèmes qui verront le jour industriellement auront-ils vraisemblablement des puissances thermiques semblables, quel que soit leur principe.

Pour confronter les techniques de surrégénération, nous avons donc examiné des installations de puissances comparables, en prenant comme référence la puissance des réacteurs nucléaires industriels classiques: 3 300 MW (th). Parmi les réacteurs de fission, on constate sur le tableau que le réacteur à eau lourde est nettement le plus intéressant — donc le plus dangereux pour la prolifération des armes nucléaires. Le surrégénérateur, compte tenu du fait que la plus grande partie du plutonium qu'il fabrique est destinée à remplacer celui qu'il consomme lui-même. n'offre pas d'intérêt particulier en ce qui concerne la quantité nette de plutonium produite. En revanche, les méthodes utilisant des accélérateurs de haute énergie peuvent en principe fabriquer cinq à dix

De véritables usines de fabrication de plutonium avec un accélérateur de particules n'existent pas aujourd'hui, mais ce n'est, sans doute, qu'une question d'années.

(3) G. G. Bartholomew et al.. Concept de l'accélérateur surrégénérateur L'Energie Atomique du Canada Limitée, AECL-6363, octobre 1978. (4) P. Grand, «The use of high energy accelerators in the nuclear fuel cycle», Nature, 693, 19 avril 1979; «Les accélérateurs remplaceraient-ils les surrégénérateurs rapides ?», Courrier CERN, p. 152, mai 1978. (5) J.M. Carpenter et al.. «Pulsed spallation neutron sources» Physics Today, p. 42, décembre 1979. Bericht des ad hoc Ausschusses «Mittelflussreaktor» des BMFT, Teil II, Spallationsneutronenquelle, Bonn 1979; J.P. Blaser, «What accelerators for future nuclear and meson physics ?», IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-26, 1979 : Report on the national workshop on advanced high-energy accelerators in India». 8-11 octobre 1979, Bombay, janvier 1980. (6) A. Gsponer, «Implications des technologies de la fusion et des accélérateurs de particules sur la prolifération verticale et horizontale des armes nucléaires». GIPRI, 41 rue de Zurich, CH-1201 Genève, août 1980 ; B Jasani in Nuclear energy and nuclear weapon proliferation, SIPRI, Taylor and Francis, London, 1979.



énergie et société

L'ÉNERGIE SOLAIRE **EN FRANCE**

Approche socio-économique P. Criqui

• étude des conditions économiques et sociales du développement de l'énergie solaire en France en l'année 2000 • deux étapes : l'application des critères d'évolution micro-économiques aux solutions énergétiques solaires; identification des obstacles techniques, institutionnels ou financiers au développement de ces innovations.

21x29.7/244p./broché 37 fig. /58 tabl./ 3 cart. ISBN 2-222-02854-X

65 F

ATLAS OSTÉOLOGIQUE DES MAMMIFÈRES

Vol. II en 2 coffrets Léon Pales et M. A. Garcia

 dessins de squelettes et silhouettes d'animaux appartenant au laboratoire d'anatomie comparée du Muséum national d'histoire naturelle o matériel pour l'identification des mammifères du quaternaire, suite au vol. 1

coffret 1: herbivores: bison, bouquetin, castor, chevreuil, daim, lapin de garenne, lièvre, marmotte, mouflon, saiga; les espèces suivantes, étudiées en partie dans le vol. 1, sont complétées ici: bœuf, cerf, chamois, cheval, chèvre, mouton, renne, rhinocéros, sanglier.

coffret 2 : carnivores : le squelette de l'homme au complet, et : genette, loutre commune, loutre marine, fouine, renard polaire; figurent ici les membres manquants du vol. 1 blaireau, cuon, glouton, hyène, isatis, lion, loup, lynx, ours brun, panthère.

32x50/264p. planches détachées en 2 coffrets **550 F** ISBN 2-222-02715-2 RAPPEL/Vol. 1: 1971

231 F

documentation gratuite sur demande

Librairie des Editions du CNRS

15 quai Anatole France. 75700 Paris

fois plus de matière fissile que des réacteurs de même puissance. Les calculs montrent qu'un faisceau de 300 mA de protons de 1 000 MeV permet de fabriquer 2 500 kg de plutonium par année (2) et que la chaleur dissipée dans la cible, convenablement récupérée, peut être mise à profit pour alimenter en électricité l'accélérateur lui-même. Notons à ce propos que si l'intérêt d'un système donné n'est plus mesuré seulement par la quantité de plutonium produit mais par l'ensemble de sa production énergétique potentielle (plutonium, plus chaleur, plus électricité) l'accélérateur conserve un net avantage.

Comme les surrégénérateurs, les accélérateurs peuvent en principe convertir jusqu'à 70 % de l'uranium 238 en plutonium. Ils peuvent également être utilisés pour transformer le thorium 232 qui existe dans la nature en uranium 233, autre combustible nucléaire artificiel. De même, à partir du lithium, on peut les utiliser pour fabriquer du tritium pour la fusion ou les bombes à hydrogène.

Les matériaux irradiés par un accélérateur doivent évidemment être retraités pour en extraire les substances désirées. Pour ce retraitement, les systèmes avec accélérateur présentent des avantages intéressants. En effet, l'énergie dissipée dans une cible de spallation ou dans un réacteur provient principalement de la brisure ou de la fission de divers noyaux. Pour un accélérateur, l'énergie dissipée par noyau de plutonium produit est cinq à dix fois plus faible que pour un réacteur : la contamination en produits de fission radioactifs non utilisables sera d'autant plus faible. De surcroît, le manteau dans lequel la majorité des neutrons sont absorbés est nettement moins contaminé que la cible elle-même. Le retraitement en est grandement facilité et, de plus, le plutonium extrait est de bonne qualité militai-

Des projets concrets existent.

Le fait est peu connu : c'est grâce à un accélérateur de particules que le plutonium a été produit pour la première fois à Berkeley en 1941, pratiquement deux ans avant la mise en fonctionnement du premier réacteur nucléaire. Des deutérons accélérés par un cyclotron frappaient une cible de beryllium et les neutrons produits transformaient de l'uranium 238 en plutonium. La première tentative de production de plutonium en grande quantité au moyen d'un accélérateur remonte au début des années 1950. C'était le très secret projet MTA (Material Testing Accelerator), dû à un groupe de Berkeley. Un prototype de l'accélérateur fut essayé avec succès. Mais le projet fut abandonné en 1954 après la découverte de grands gisements d'uranium dans l'Ouest américain. La disponibilité de cet uranium facile à extraire permettait en effet de produire le plutonium de façon plus avantageuse dans un réacteur nucléaire.

Depuis les années 1950, la technologie des accélérateurs s'est considérablement

développée et certaines analyses économiques montrent que leur utilisation pour la fabrication du plutonium devient économiquement compétitive (3,4). Divers projets concrets existent au Canada et aux Etats-Unis, et leurs promoteurs estiment qu'une utilisation commerciale des accélérateurs dans le domaine de l'énergie nucléaire d'ici vingt ans est techniquement possible (4). L'étude la plus avancée est celle du laboratoire de Brookhaven près de New York (fig.). L'accélérateur proposé produirait un faisceau de 300 mA de protons de 1 000 MeV et aurait une lonqueur d'environ 1 000 m. La cible de spallation et le matériau à irradier seraient contenus dans une enceinte de confinement, semblable à celle d'un réacteur nucléaire, située à l'extrémité de l'accélérateur. Dans ce système, l'utilisation des neutrons de spallation est envisagée soit pour irradier de l'uranium 238 ou du thorium, dont la matière fissile serait alors extraite par retraitement, soit pour «enrichir» en plutonium des barreaux de combustible nucléaire qui, après irradiation, seraient transférés directement dans un réacteur pour y être brûlés (4).

D'autres pays, tels que l'Angleterre, l'Allemagne, le Japon, la Suisse et même les Indes, construisent ou projettent des sources intenses de neutrons de spallation pour la recherche en physique nucléaire (5). Ces installations permettront l'étude de la surrégénération du plutonium avec des accélérateurs et en particulier de développer la cible, qui est précisément la partie du système qui présente les difficultés de réalisation les plus importantes. En ce qui concerne l'accélérateur, il n'y a pas de problème de principe, bien que, à l'heure actuelle, il n'existe aucun accélérateur en fonctionnement qui possède simultanément l'énergie et l'intensité moyenne requises. Par exemple, l'accélérateur linéaire de 800 MeV de Los Alamos au Nouveau Mexique produit un faisceau de protons d'une intensité moyenne de 0,6 mA. Celui de 200 MeV qui est utilisé pour la recherche à Brookhaven accélère des paquets de protons correspondant à des courants de 200 mA durant des impulsions dont la longueur n'est essentiellement limitée que par la puissance de l'alimentation électrique de l'accéléra-

Il est intéressant de remarquer que si l'ensemble des installations nucléaires d'un pays membre du Traité de non-prolifération sont placés sous le contrôle de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, les accélérateurs de particules font exception: ils ne sont soumis à aucun contrôle international. D'autre part, il n'existe encore aucun débat sur le rôle de cette technologie du point de vue de la prolifération. Ce risque de prolifération, souligné dans les publications du SIPRI et du GIPRI (6), est pourtant bel et bien lié aux utilisations possibles des techniques de l'accélération, que ce soit pour fabriquer du plutonium, ou pour expérimenter et perfectionner les armes nucléires.

André Gsponer