

Rapport établi conjointement par
l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire
et l'Agence internationale de l'énergie atomique

OCDE 



Gestion de l'uranium appauvri



A G E N C E • P O U R • L ' É N E R G I E • N U C L É A I R E

© OCDE, 2001.

© Logiciel, 1987-1996, Acrobat, marque déposée d'ADOBE.

Tous droits du producteur et du propriétaire de ce produit sont réservés. L'OCDE autorise la reproduction d'un seul exemplaire de ce programme pour usage personnel et non commercial uniquement. Sauf autorisation, la duplication, la location, le prêt, l'utilisation de ce produit pour exécution publique sont interdits. Ce programme, les données y afférentes et d'autres éléments doivent donc être traités comme toute autre documentation sur laquelle s'exerce la protection par le droit d'auteur.

Les demandes sont à adresser au :

Chef du Service des Publications,
Service des Publications de l'OCDE,
2, rue André-Pascal,
75775 Paris Cedex 16, France.

Développement de l'énergie nucléaire

La Gestion de l'uranium appauvri

**Rapport conjoint de
l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire et
l'Agence internationale de l'énergie atomique**

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996), la Corée (12 décembre 1996) et la République slovaque (14 décembre 2000). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

L'AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OEEC. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays Membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 27 pays Membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

- d'aider ses pays Membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ; et
- de fournir des évaluations faisant autorité et de dégager des convergences de vues sur des questions importantes qui serviront aux gouvernements à définir leur politique nucléaire, et contribueront aux analyses plus générales des politiques réalisées par l'OCDE concernant des aspects tels que l'énergie et le développement durable.

Les domaines de compétence de l'AEN comprennent la sûreté nucléaire et le régime des autorisations, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, les sciences nucléaires, les aspects économiques et technologiques du cycle du combustible, le droit et la responsabilité nucléaires et l'information du public. La Banque de données de l'AEN procure aux pays participants des services scientifiques concernant les données nucléaires et les programmes de calcul.

Pour ces activités, ainsi que pour d'autres travaux connexes, l'AEN collabore étroitement avec l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne, avec laquelle un Accord de coopération est en vigueur, ainsi qu'avec d'autres organisations internationales opérant dans le domaine de l'énergie nucléaire.

© OCDE 2001

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France. Tél. (33-1) 44 07 47 70. Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, ou CCC Online : <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

PRÉFACE

En 1999, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) et l'Agence internationale de l'énergie atomique ont décidé d'un commun accord d'établir un groupe d'experts pour entreprendre une étude sur la gestion et l'utilisation possible de l'uranium appauvri. Ce groupe visait à offrir un cadre pour d'une part promouvoir une meilleure compréhension de la situation générale, des tendances et de la gestion en ce qui a trait à l'uranium appauvri et, d'autre part, pour échanger de l'information, partager des expériences et explorer les domaines où des projets internationaux de coopération pourraient être établis. Les résultats de cette étude font l'objet du présent rapport.

Le rapport ne s'intéresse qu'à l'uranium appauvri contenu dans les « résidus » issus de l'enrichissement de l'uranium. Il ne traite pas des stocks d'uranium appauvri qui peuvent découler du retraitement du combustible nucléaire usé. Bien que les questions de radioprotection, de sécurité et de garanties associées à l'uranium appauvri soient pertinentes, elles ne sont pas abordées directement dans le présent rapport. De même, les considérations économiques sur d'éventuelles utilisations de l'uranium appauvri n'y sont pas développées.

Toute utilisation de l'uranium appauvri envisagée dans le cadre du présent rapport ne concerne que des applications pacifiques. Les utilisations de l'uranium appauvri à des fins militaires ne sont pas traitées.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE.....	3
EXPOSÉ DE SYNTHÈSE	7
I. INTRODUCTION.....	9
II. INVENTAIRES ACTUELS D'URANIUM APPAUVRI.....	11
III. TENDANCES.....	15
IV. GESTION À LONG TERME.....	19
V. UTILISATIONS ENVISAGÉES	25
VI. COOPÉRATION INTERNATIONALE	35
VII. PRINCIPALES QUESTIONS.....	37
RÉFÉRENCES.....	39
ANNEXES	
1. Glossaire.....	41
2. Installations d'enrichissement en service.....	45
3. Caractéristiques de l'uranium appauvri	47
4. Programmes, activités et plans relatifs à l'uranium appauvri mentionnés par les pays et les organisations ayant participé	51
5. Membres du groupe d'experts sur les autres utilisations et la gestion de l'uranium appauvri.....	65

EXPOSÉ DE SYNTHÈSE

Le présent rapport sur la gestion de l'uranium appauvri donne un aperçu de l'inventaire actuel, potentiel et futur d'uranium appauvri, ainsi que des méthodes de gestion et de ses utilisations possibles. Par définition, la teneur en ^{235}U de l'uranium appauvri est inférieure à 0,711 %, qui est celle de l'uranium à l'état naturel. Depuis les tous débuts de l'ère nucléaire, d'importantes quantités d'uranium appauvri ont été engendrées comme sous-produit de l'enrichissement de l'uranium. On estime actuellement que les stocks mondiaux d'uranium appauvri s'élèvent à environ 1,2 million de tonnes d'U. Les réserves se présentent surtout sous forme d'hexafluorure d'uranium (UF_6) placé dans des cylindres métalliques et entreposés dans les installations d'enrichissement. L'uranium appauvri constitue une ressource prometteuse comme source d'énergie, matériau de blindage ou encore dans diverses applications industrielles. Comme les champs d'utilisation sont actuellement limités, les pays qui possèdent déjà des réserves d'uranium appauvri sont intéressés à échanger des informations sur son entreposage sûr, ses applications potentielles futures et les solutions de traitement.

On estime que les stocks d'uranium appauvri provenant des installations d'enrichissement pourraient s'accroître d'au moins 57 000 t d'U par an dans un avenir prévisible, bien que cet accroissement soit susceptible d'être réduit de 20 % dans certains scénarios de recours au mélange avec de l'uranium hautement enrichi pour en abaisser la teneur et au combustible à base d'oxydes mixtes (MOX).

L'uranium appauvri peut être entreposé en plein air en toute sécurité sous forme d' UF_6 placé dans des conteneurs gainés d'acier, à condition qu'il existe un programme de gestion des conteneurs garantissant leur intégrité contre toute dégradation. La technologie de transformation en U_3O_8 est disponible à l'échelle commerciale et de nouvelles techniques existantes ou en développement sont utilisables pour transformer l' UF_6 en d'autres formes chimiques qui peuvent être conservées en toute sécurité dans des entrepôts. Dans tous les cas, il convient de tenir compte des incidences sur l'environnement, la sûreté et la santé des travailleurs et de la population habitant près du site d'entreposage.

Un certain nombre de pays poursuivent leur propre programme de recherche et de développement sur les utilisations possibles de l'uranium appauvri et sont intéressés à des collaborations internationales dans ce domaine. Sauf dans les cas où de tels projets sont soutenus par les pouvoirs publics, ce type de collaboration sera vraisemblablement freiné par la concurrence commerciale ou essentiellement limité à l'échange d'informations et d'expériences.

L'évacuation à long terme de l'uranium appauvri ne devra être envisagée que si l'on en vient à considérer que les stocks n'offrent aucun potentiel de réutilisation économique.

Ce rapport traduit une prise de conscience croissante de la part des pays qui possèdent de l'uranium appauvri de la nécessité d'assurer une gestion adéquate de leurs stocks et de faire des recherches sur les éventuelles utilisations et les solutions d'évacuation de ce matériaux. Il souligne certaines questions importantes qui requièrent une attention particulière, telles la détermination des quantités d'uranium appauvri qu'il est souhaitable d'entreposer, sous quelle forme et pour combien de temps ainsi que les conséquences éventuelles de son évacuation définitive. À cet égard, le réenrichissement devrait rendre inutile l'évacuation finale pendant plusieurs décennies.

I. INTRODUCTION

Le combustible de la plupart des réacteurs nucléaires qui sont actuellement en exploitation dans le monde est constitué d'uranium faiblement enrichi issu des installations d'enrichissement. L'uranium appauvri, c'est-à-dire l'uranium dont la teneur en ^{235}U est inférieure celle de l'uranium naturel, soit 0,711 %, est un sous-produit de l'enrichissement de l'uranium naturel ou retraité. En règle générale, la teneur en ^{235}U de l'uranium appauvri ainsi obtenu est inférieure à 0,5 %. D'importants stocks d'uranium appauvri se sont accumulés par suite des activités d'enrichissement, en particulier aux États-Unis et dans la Fédération de Russie.

Plusieurs stratégies peuvent être envisagées pour l'utilisation et la gestion de l'uranium appauvri. La stratégie retenue dépend de plusieurs facteurs, y compris la politique pratiquée par les autorités publiques et le monde des affaires, les utilisations possibles, la valeur économique de la matière, la réglementation en vigueur, les options d'évacuation et les développements du marché international en amont du cycle du combustible nucléaire. Les développements technologiques survenus dans la conversion des composés d'uranium et dans les procédés d'enrichissement sont aussi des facteurs qui ont des incidences sur les stratégies à adopter à l'avenir. L'évaluation des utilisations possibles de l'uranium appauvri est très importante avant de prendre toute décision sur l'appréciation des options de gestion.

En 1999, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ont convenu de créer un groupe d'experts chargé d'évaluer la gestion de l'uranium appauvri et ses utilisations possibles. Le Groupe d'experts a décidé d'entreprendre une étude qui offrirait une meilleure compréhension générale de la situation et des tendances relatives à la gestion de l'uranium appauvri, tout en donnant l'occasion d'échanger des informations, de partager des expériences et d'envisager des collaborations internationales entre pays Membres intéressés. Le présent rapport contient les résultats de cette étude.

Le rapport présente les stocks actuels d'uranium appauvri et leurs évolutions futures prévisionnelles, les options pour leur gestion à long terme et leur utilisation à des fins pacifiques, et les programmes nationaux dans le domaine. En outre, le rapport explore de possibles collaborations internationales et souligne des questions clés sur lesquelles les gouvernement et les décideurs politiques devraient se pencher.

Le rapport ne traite que de l'uranium appauvri qui découle des « résidus » issus des usines d'enrichissement. Il n'aborde pas les stocks d'uranium appauvri provenant du retraitement du combustible nucléaire usé, qui est la plupart du temps soit du combustible Magnox (dont la teneur en ^{235}U est inférieure à 0,5 %) soit du combustible de réacteur à gaz ou à eau ordinaire à haut taux de combustion (dont la teneur est normalement supérieure à 0,5 %). Les quantités d'uranium appauvri provenant du retraitement sont inférieures à celles issues de l'enrichissement (moins de 5 % de l'ensemble des stocks mondiaux d'uranium appauvri) et sont généralement gérées différemment.

L'uranium appauvri est légèrement radioactif en raison des émissions alpha et bêta des isotopes d'uranium et de leurs produits de filiation. La gestion et les utilisations possibles de cette matière doivent donc être conformes aux principes et pratiques de radioprotection. L'uranium appauvri doit

aussi être protégé physiquement et peut être assujetti aux garanties internationales. Bien que les questions de radioprotection, de sécurité et de garanties liées à l'uranium appauvri soient importantes, elles ne sont pas traitées spécifiquement dans le présent rapport.

Dans le contexte du présent rapport, les utilisations possibles de l'uranium appauvri visent plutôt les utilisations pacifiques. Toute utilisation d'uranium appauvri à des fins militaires en est donc exclue, de même que toute considération économique sur ses utilisations possibles.

II. INVENTAIRES ACTUELS D'URANIUM APPAUVRI

Des stocks d'uranium appauvri existent en plusieurs endroits dans le monde et, en particulier, dans les pays qui ont exploité ou qui exploitent toujours des installations d'enrichissement de l'uranium. Une liste des installations d'enrichissement actuellement en service et leurs caractéristiques (y compris le lieu, le type, la capacité et la date de mise en service) figure au tableau 2 de l'annexe 2. Des installations d'enrichissement sont en exploitation depuis les années 1940 et leur fonctionnement pendant environ un demi siècle a conduit à l'accumulation d'importantes quantités d'uranium appauvri. Les informations fournies par les pays Membres et les organisations qui ont participé à l'étude sur leurs programmes, leurs activités et leurs projets concernant l'uranium appauvri sont présentées à l'annexe 4.

L'uranium appauvri est entreposé sous différentes formes, y compris l'hexafluorure d'uranium (UF_6), le tétrafluorure d'uranium (UF_4), les oxydes d'uranium (U_3O_8 , UO_2 et UO_3) et l'uranium métal. Les caractéristiques des différents composés d'uranium appauvri varient d'une forme à l'autre et peuvent avoir des incidences importantes lorsqu'il s'agit de les gérer et de les évacuer. Les caractéristiques des diverses formes d'uranium appauvri sont résumées à l'annexe 3.

Les stocks mondiaux actuels d'uranium appauvri sont estimés à environ 1,2 million de tonnes d'uranium naturel (t d'U). Environ 80 % de ces stocks sont situés aux États-Unis et dans la Fédération de Russie, principalement sous forme d' UF_6 appauvri. La liste de ces stocks est présentée au tableau 1.

États-Unis

Les stocks d'uranium appauvri du Ministère de l'énergie (USDOE) proviennent en majeure partie de l'exploitation de trois installations de diffusion gazeuse dont la construction remonte aux années 1940 et 1950. L'installation K-25 d'Oak Ridge (Tennessee), qui est la plus ancienne, a fermé en 1985. L'exploitation des deux autres installations, à Paducah (Kentucky) et à Portsmouth (Ohio), respectivement, ont été reprises par la *United States Enrichment Corporation* (USEC), en 1993. En juin 2000, les stocks américains d'uranium appauvri (y compris les résidus d'USEC) s'élevaient à quelque 515 000 t d'U, dont environ 480 000 se présentent sous forme d'hexafluorure et sont placés dans des cylindres de 48 pouces (1,22 m) qui sont rangés horizontalement sur deux niveaux dans des aires de stockage en surface sur le site des trois installations.

Fédération de Russie

Les stocks de la Fédération de Russie s'accumulent depuis le début des années 1950 et découlent de l'exploitation de quatre installations de diffusion gazeuse (qui sont toutes fermées) et des installations d'enrichissement par centrifugation qui les ont remplacées. On estime que les stocks s'élèvent à environ 460 000 t d' U^1 ; la majeure partie (98 %) se présente sous forme d' UF_6 placé dans

1. Estimation basée sur le rapport de 1996 de l'*Uranium Institute* [1].

des conteneurs verticaux en acier inoxydable qui sont entreposés dans des aires de stockage en surface, tandis que le reste se présente sous forme d'oxydes, de métal et de diuranate de calcium.

Tableau 1. **Stocks actuels d'uranium appauvri et plans futurs (fin 1999)**

Détenteur	Forme actuelle d'entreposage	Stock (t d'U)	Plan de gestion
États-Unis			
USDOE et USEC	UF ₆ dans des conteneurs de 48 pouces stockés sur des radiers en plein air sur trois sites. Remise en peinture des conteneurs et remplacement des radiers en cours.	~480 000 ^a	Construire 2 installations de déconversion et les mettre en service en 2005, (choix de la technologie en 2000). Identifier des utilisations en 2009.
Fédération de Russie			
	UF ₆ dans des conteneurs verticaux en acier de 2,5 m ³ ; quelques conteneurs de 48 pouces stockés en surface. Métal et oxydes.	~450 000 ^b ~10 000 ^b	Poursuivre l'entreposage d'UF ₆ comme ressource future. Étudier les technologies de déconversion.
France			
COGEMA et Eurodif	U ₃ O ₈ dans des conteneurs peints de 3 m ³ , empilés sur trois rangées dans des entrepôts sur deux sites.	~140 000	Poursuivre la déconversion et l'entreposage sous forme d'U ₃ O ₈ comme ressource future. Recyclage de petites quantités dans du combustible MOX.
	UF ₆ dans des conteneurs de 48 pouces stockés sur des radiers en plein air.	~50 000	Poursuivre la déconversion et l'entreposage sous forme d'U ₃ O ₈ comme ressource future.
Royaume-Uni			
BNFL	UF ₆ dans des conteneurs de 48 pouces et 0236 sur des radiers stockés en plein air sur deux sites. Nettoyage, nouvel enduit et transfert à l'intérieur des conteneurs 0236.	~30 000	Poursuivre l'entreposage comme ressource future. Étudier les technologies de déconversion pour produire du métal.
Urenco			
Allemagne, Pays-Bas et Royaume-Uni	UF ₆ dans des conteneurs de 48 pouces stockés sur des radiers en plein air sur trois sites.	~16 000	Poursuivre l'entreposage d'UF ₆ comme ressource future. Réenrichir si la solution est rentable. Entreposage sous forme d'U ₃ O ₈ prévu dans un avenir indéterminé.
Japon			
	UF ₆ dans des conteneurs de 30 pouces et de 48 pouces stockés dans des bâtiments.	~10 000 ^c	Construire une installation de déconversion pour produire bientôt de l'U ₃ O ₈ (choix de la technologie en 2000). Identifier des utilisations et entreposer comme ressource future.
Chine			
	UF ₆ dans des conteneurs verticaux de 48 pouces et 1 m ³ stockés dans un bâtiment aux conditions contrôlées.	~2 000 ^d	Poursuivre l'entreposage d'UF ₆ comme ressource future.
République de Corée			
	UF ₆ dans des conteneurs de 48 pouces entreposés sur une aire de stockage en plein air.	~200	Poursuivre l'entreposage d'UF ₆ comme ressource future. Étudier les utilisations.
Total estimatif		1 188 200	

Notes:

a. Au milieu de 2000.

b. Estimation basée sur le rapport de 1996 de l'*Uranium Institute* [1].

c. En février 2001.

d. À la fin de 2000.

France (COGEMA/Eurodif)

Les stocks de la Compagnie générale des matières nucléaires (COGEMA) et d'Eurodif sont issus des activités de l'installation de diffusion gazeuse d'Eurodif exploitée en France depuis 1979. Les quelque 190 000 t d'uranium appauvri sont stockées soit sous forme d' U_3O_8 placé dans des caissons en acier doux peints de 3 m³, placés dans des entrepôts (~75 %), soit sous forme d' UF_6 placé dans des conteneurs de 48 pouces (1,22 m) entreposés dans sur des aires de stockage en plein air. COGEMA déconvertit les stocks d' UF_6 en U_3O_8 près de l'usine d'enrichissement.

Royaume-Uni (BNFL)

Les stocks de *British Nuclear Fuel plc* (BNFL) proviennent surtout de l'installation de diffusion gazeuse qui a fonctionné depuis le milieu des années 1950 jusqu'au début des années 1980 et est maintenant déclassée, ainsi que de l'installation d'enrichissement par centrifugation qui est en service depuis le début des années 1980 et est actuellement exploitée par Urenco. L'ensemble des stocks, qui s'élève à 30 000 t d'U, est placé dans des conteneurs de 48 pouces et des conteneurs verticaux 0236 en acier qui sont entreposés dans des aires de stockage en plein air. Il existe aussi des stocks sous forme de métal, d'oxydes et d' UF_4 .

Japon

Les stocks du Japon découlent de l'exploitation en cours des installations d'enrichissement par centrifugation de l'Institut japonais pour le développement du cycle nucléaire (*Japan Nuclear Cycle Development Institute – JNC*) et de la société *Japan Nuclear Fuel Limited* (JNFL) depuis la fin des années 1970 et le début des années 1990, respectivement.

En 2001, les stocks totalisaient environ 10 000 t d'U sous forme d' UF_6 et étaient placés dans des conteneurs de 30 pouces (76 cm) et de 48 pouces qui sont entreposés dans des bâtiments.

Chine

Les stocks civils de 2 000 t d'U de la Chine proviennent de l'exploitation en cours de l'installation d'enrichissement par centrifugation de la Société nucléaire nationale de Chine (*China National Nuclear Corporation – CNNC*) depuis la fin des années 1990. Les stocks sont placés dans des conteneurs verticaux en acier de 48 pouces et de 1 m³ qui sont entreposés dans des bâtiments contrôlés. L'expérience de l'entreposage de conteneurs semblables dans des conditions similaires ailleurs en Chine remonte à plus de 30 ans.

République de Corée

La République de Corée n'a pas d'installation d'enrichissement, mais l'Institut coréen de recherches sur l'énergie atomique (*Korea Atomic Energy Research Institute – KAERI*) détient des stocks d'uranium appauvri. Les stocks proviennent des activités d'enrichissement réalisées par les États-Unis pour la République de Corée. Les stocks actuels comprennent environ 184,8 t d' UF_6 , 9,6 t d' UF_4 et 3,8 t d'uranium métal.

Urenco (sites en Allemagne, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni)

Les stocks d'Urenco sont issus des installations d'enrichissement par centrifugation qui sont toujours en service au Royaume-Uni et aux Pays-Bas depuis le milieu des années 1970, ainsi qu'en Allemagne depuis le milieu des années 1980.

Les stocks de 16 000 t d'U se présentent presque entièrement sous la forme d' UF_6 placé dans des conteneurs de 48 pouces qui sont entreposés dans des aires de stockage en plein air sur les trois sites.

Autres stocks

Divers autres programmes ont aussi engendré de l'uranium appauvri à travers le monde. Par exemple, deux installations d'enrichissement d'Afrique du Sud ont fermé en mars 1995 après avoir produit 2 200 t d'uranium appauvri grâce aux procédés par tuyère et « hélikon », respectivement. La majeure partie des stocks sud-africains a été vendue sur le marché international. À la fin de 1999, les stocks sud-africains restant étaient estimés à 73 t se présentant principalement sous forme de métal et d'oxydes (poudres). Environ 4 t sont entreposées sous forme d' UF_6 . Les oxydes sont entreposés dans des conteneurs, tandis que le métal est empilé sous forme de lingots dans des installations. Une partie de l'uranium métal appauvri entre dans la composition des conteneurs utilisés pour le transport des produits commerciaux à base de radio-isotopes, surtout à l'exportation [2].

D'autres activités d'enrichissement qui ont produit des résidus qui ne sont pas mentionnés ci-dessus car il n'existe pas de donnée fiable à leur sujet.

III. TENDANCES

Production future d'uranium appauvri

Il existe actuellement une surcapacité de services d'enrichissement d'environ 50 % par rapport à la demande du marché primaire. Des capacités nouvelles, par centrifugation, continuent cependant à être mises en service. Cette surcapacité est actuellement exacerbée par mise sur le marché de l'uranium hautement enrichi d'origine militaire susceptible d'être recyclé à des fins civiles après abaissement de sa teneur en ^{235}U . Les principales sources de services d'enrichissement et, par conséquent, d'uranium appauvri dans un avenir prévisible, sont les installations énumérées au tableau 2 de l'annexe 2, qui sont situées en Allemagne, en Chine, aux États-Unis, en France, au Japon, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Fédération de Russie.

La production future d'uranium appauvri dépendra essentiellement des besoins en services d'enrichissement des centrales nucléaires en service dans le monde. Au cours des 15 prochaines années, on prévoit que la capacité totale de ces centrales connaîtra une légère augmentation dans la mesure où les mises en service excéderont les déclassements. À plus long terme, le développement de l'énergie nucléaire dépendra entre autres de sa compétitivité, de son acceptation par le public et de l'importance accordée par le public au risque de réchauffement planétaire.

La présente étude se base sur un cas de référence selon lequel la demande en uranium s'élèverait à 65 000 t d'U/a et les besoins d'enrichissement à 36,5 millions d'UTS/a (avec une teneur de rejet de 0,3 % en ^{235}U), ce qui équivaut à une puissance installée de l'ordre de 375 GWe. Pour un tel scénario, la production de résidus primaires dans les pays qui exploitent les usines d'enrichissement atteindrait 57 000 t d'U/a.

Au-delà de la demande primaire des centrales nucléaires, deux autres facteurs importants auront une incidence sur le volume d'uranium appauvri produit :

- L'utilisation d'approvisionnements secondaires pour remplacer l'enrichissement primaire, y compris l'utilisation du plutonium issu du combustible retraité et du surplus des stocks militaires de combustibles d'oxydes mixtes (MOX) et l'utilisation du surplus d'uranium hautement enrichi d'origine militaire dont la teneur a été abaissée.
- Les taux de rejet des usines d'enrichissement qui seront affectés par des facteurs tels que le prix relatif de l' U_3O_8 et des services d'enrichissement.

Approvisionnement secondaires

Uranium hautement enrichi

L'abaissement de la teneur de l'uranium hautement enrichi militaire déclaré excédentaire pour produire de l'uranium faiblement enrichi qui servira dans les réacteurs commerciaux est déjà une réalité dans la Fédération de Russie et aux États-Unis. Selon les plans actuels, 30 t/a d'uranium hautement enrichi russe verront leur teneur réduite d'ici à 2013, tandis que 10 t/a d'uranium hautement enrichi américain (d'une teneur moyenne inférieure) subiront le même sort avant la fin de la présente décennie. Dépendant des développements politiques à venir, la durée de ces campagnes pourrait être prolongée ou abrégée. L'utilisation de cet uranium hautement enrichi réduit les besoins en services d'enrichissement primaire des réacteurs et, partant, la future production d'uranium appauvri (résidus) d'environ 15 %.

Pour abaisser la teneur de l'uranium hautement enrichi au niveau suffisant pour produire de l'uranium faiblement enrichi utilisable dans des réacteurs commerciaux, il faut produire de l'uranium enrichi à 1,5 % à partir des résidus (afin de se conformer aux spécifications d'isotopes mineurs). Ainsi, dans le cas des 30 t d'U/a d'uranium hautement enrichi russe, il faut disposer de 850 t d'U/a à 1,5 % pour fabriquer un produit à 4,6 %. Les résidus consommés à cette fin représentent environ 1,5 % de la production primaire. Cela réduira aussi la teneur en ^{235}U des 5 950 à 11 000 t d'U des résidus secondaires restants de 0,3-0,2 % à 0,1 %.

Combustible MOX

Les installations de retraitement et de fabrication de combustible MOX en service permettraient de réduire de quelques 5 % les besoins mondiaux en services d'enrichissement primaire pour alimenter les réacteurs en fonctionnement, ce qui réduirait 5 % la production d'uranium appauvri.

L'utilisation potentielle dans du combustible MOX du plutonium déclaré excédentaire par rapport aux besoins de la sécurité nationale est actuellement à l'étude dans la Fédération de Russie et aux États-Unis. Un accord bilatéral en ce sens a été signé par les deux pays en septembre 2000. L'incorporation d'environ 3 tonnes de plutonium par an dans du combustible MOX réduirait d'environ 1 % les besoins d'enrichissement primaire.

Uranium retraité et stocks

Comme dans le cas du combustible MOX, l'utilisation d'uranium retraité dépend de l'exploitation des installations de retraitement en France, au Japon et au Royaume-Uni. Si toutes ces installations fonctionnent à plein régime et que l'uranium de retraitement était réenrichi, on pourrait réduire de moins de 1 % les besoins d'enrichissement primaire et la production de résidus (en supposant que l'uranium de retraitement dont la teneur est de 0,8 % est enrichi à 3,65 % alors que l'uranium naturel est enrichi à 3,5 %, avec un taux de rejet de 0,3 % dans les deux cas).

Une autre option serait de mélanger l'uranium de retraitement à de l'uranium hautement enrichi pour produire de l'uranium faiblement enrichi d'une teneur convenable pour les réacteurs. Dans ce cas, la réduction des besoins d'enrichissement primaire et de la production de résidus varierait suivant les cas.

On a supposé que les stocks d'uranium enrichis sont maintenus à leurs niveaux actuels. Les modifications envisageables à cet égard auraient une influence insignifiante sur les résidus produits par rapport à la production totale au cours des prochaines décennies.

Teneur de rejet des usines d'enrichissement

La recherche du coût minimal par le producteur d'électricité nucléaire détermine la teneur du produit et des rejets ainsi que le volume de produit primaire nécessaire pour chaque réacteur. Un facteur capital à ce titre est le coût relatif des services d'enrichissement et de l' U_3O_8 . Plus le prix de ce dernier est élevé, plus la teneur optimale de rejet sera faible, à un coût d'enrichissement donné. Ceci représente le principal facteur qui détermine le volume de résidus produits. Toutefois, l'exploitant de l'installation d'enrichissement pourrait, pour des raisons d'économie, de politique ou de planification de la capacité, décider de l'exploiter temporairement ou à long terme à des teneurs moyennes de rejet supérieures ou inférieures.

En général, la teneur en ^{235}U des résidus issus de l'exploitation commerciale primaire des installations d'enrichissement varie entre 0,25 et 0,35%. Par rapport à l'hypothèse moyenne courante d'un taux de rejet de 0,3 %, cette fourchette de teneurs fait osciller le volume d'uranium appauvri produit entre -10 % et +14 %. Bien que l'excédent actuel d'approvisionnements secondaires déprime le prix de l' U_3O_8 , la teneur optimale de rejet en ^{235}U demeurera au-dessus de 0,3%. À long terme, à mesure que les réserves d' U_3O_8 bon marché s'épuiseront et que le prix montera, la teneur optimale de rejet devrait revenir sous la barre de 0,3 %. La réponse de l'exploitant, toutefois, est impossible à déterminer et sa teneur d'exploitation restera toujours une question commerciale confidentielle.

Résumé

En l'absence d'approvisionnements secondaires, on peut supposer que la production d'uranium appauvri primaire augmentera légèrement ou se maintiendra au niveau actuel de 57 000 t d'U/a. Une réduction de ce niveau pouvant atteindre jusqu'à 20 % est cependant possible grâce au recours au combustible MOX et à l'utilisation de l'uranium hautement enrichi, qui réduiraient la production annuelle de résidus primaires d'environ 45 000 t d'U/a, aussi longtemps que ces procédés seraient utilisés.

IV. GESTION À LONG TERME

Stratégie

Toute stratégie de gestion à long terme de l'uranium appauvri repose sur le principe qu'il s'agit d'une matière valorisable qui peut servir à diverses applications. Cette stratégie dépend d'un certain nombre de facteurs, mais principalement du développement futur des programmes électronucléaires dans le monde. À l'heure actuelle, ce sont les réacteurs à eau ordinaire qui produisent le plus d'électricité et il en sera ainsi tout au long des prochaines décennies dans la mesure où le développement des programmes de réacteurs rapides a été retardé ou même abandonné dans de nombreux pays. Il est fort probable, cependant, que l'utilisation à très long terme de l'énergie nucléaire nécessite un jour la mise en œuvre de réacteurs rapides, ce qui ferait alors de l'uranium appauvri une importante source d'énergie.

L'uranium appauvri recyclable par réenrichissement représente une source potentielle d' ^{235}U pour les réacteurs à eau ordinaire, tandis que l' ^{238}U résiduel pourrait servir de « couvertures » dans les réacteurs rapides. Toutefois, à défaut d'applications à grande échelle, comme celles-ci ou d'autres, l'évacuation définitive dans un dépôt d'une forme à définir devra être envisagée. Entre-temps, la stratégie vise avant tout l'entreposage économique de cette matière dans des installations sûres et écologiquement propres qui garantiront sa disponibilité pour usage ultérieur.

Échéances

Dans les conditions actuelles, l'échelle de temps affectée à la gestion de l'uranium appauvri dépend des facteurs économiques du réenrichissement par rapport à l'extraction minière des ressources primaires en uranium. À ce propos, l'édition 1999 du rapport conjoint de l'AIEA et de l'AEN, intitulé *Uranium : Ressources, production et demande* [3] fait état de « ressources raisonnablement assurées » et de « ressources supplémentaires estimées » d'au moins 1 254 000 t d'U au 1^{er} janvier 1999 récupérables à moins 40 \$/kg d'U. À raison d'une demande annuelle en uranium de 65 000 t d'U/a, ces ressources primaires devraient durer au moins 20 ans. Étant donné la disponibilité de matières « civiles » dans les réserves, le recyclage des matières militaires excédentaires et l'utilisation de l'uranium et du plutonium issus du retraitement du combustible des centrales nucléaires, ces ressources primaires dureront beaucoup plus longtemps. Selon les données actuelles, 3 millions de tonnes d'U au total sont disponibles à moins de 80 \$/kg d'U, ce qui devrait suffire pour exploiter tous les réacteurs pendant 46 ans. Toutefois, il est fort possible qu'à un moment donné au cours des 50 prochaines années, le premier réenrichissement des résidus devienne économique par rapport à l'extraction minière des ressources primaires². Les résidus secondaires contiendront toujours des quantités importantes d' ^{235}U et, vu les ressources futures limitées d'uranium à moins de 130 \$/kg d'U, un second réenrichissement pourrait bien s'avérer économique avant 20 ou 30 ans.

2. Pour produire 1 kg d'U d'une teneur en ^{235}U de 0,711 %, il faut un apport de 3,894 kg d'U d'une teneur en ^{235}U de 0,3 % et 1 UTS, laissant des résidus secondaires d'une teneur en ^{235}U de 0,158 %.

Les exigences en matière de gestion de l'uranium appauvri sont donc régies par le besoin d'entreposage économique au cours des sept à dix prochaines décennies afin d'en assurer la disponibilité en vue de pouvoir remplacer et compléter la production primaire par le réenrichissement. Cette période couvre le temps voulu pour développer des réacteurs rapides au cas où l'application de cette technologie deviendrait pertinente.

Entreposage de l'hexafluorure d'uranium (UF₆)

Du point de vue technique, l'uranium appauvri peut être entreposé en toute sûreté dans des conteneurs en acier peints, placés sur des aires de stockage en plein air. Il n'y a pas de problème de corrosion interne. Les facteurs limitants sont la corrosion externe des conteneurs et l'intégrité des sceaux de raccordement. Toutefois, l'influence de ces facteurs peut être réduite au minimum par le biais d'un programme approprié de maintenance préventive.

Corrosion externe

La corrosion externe a trois causes principales qui peuvent toutes être évitées :

- Contact permanent avec l'eau
Tout contact avec l'eau peut provoquer la corrosion ponctuelle et la perforation éventuelle de la paroi du conteneur. Cette situation peut être évitée en concevant et en construisant correctement l'aire de stockage en la dotant d'un bon système de drainage et/ou en veillant à ce que le corps du conteneur soit élevé au-dessus du sol. Des inspections doivent être faites périodiquement pour assurer la stabilité des structures d'appui des conteneurs et du système de drainage de l'aire.
- Endommagement en cours de manipulation
Toute avarie du conteneur en cours de manipulation soit, par exemple, pendant l'exploitation de l'installation, le transfert ou l'entreposage sur l'aire de stockage, peut endommager la couche (protectrice) de peinture et la structure du conteneur elle-même. Les deux peuvent ainsi créer des foyers de corrosion superficielle. Un traitement rapide et une remise en peinture de la surface concernée empêcheront toute rouille en surface.
- Vieillesse général des peintures
En plein air, les surfaces peintes sont soumises à toutes sortes de conditions atmosphériques, à l'érosion éolienne et aux phénomènes naturels. Ces conditions entament lentement l'intégrité de la couche de peinture ce qui peut conduire à l'écaillage ponctuel du revêtement et créer ainsi des foyers isolés de corrosion qui s'étendent avec le temps. Des inspections périodiques de ces surfaces, assorties à un traitement rapide et à une remise en peinture, empêcheront toute rouille en surface.

L'entreposage des conteneurs dans des bâtiments où l'humidité est contrôlée et où la condensation sur les conteneurs ne peut se produire réduit davantage le nombre d'inspections et des travaux réguliers et ponctuels de traitement et de remise en peinture.

Les conteneurs d'UF₆ anciens qui n'ont pas été inspectés régulièrement et pour lesquels toute trace superficielle de rouille n'a pas été traitée et repeinte forment un groupe à part. En principe, ces conteneurs peuvent être nettoyés/traités, repeints, placés sur des aires de stockage et entreposés ainsi indéfiniment, à condition que la paroi des conteneurs ne soit pas perforée par la rouille ou qu'il n'y ait pas de surfaces ponctuelles où la corrosion ait sensiblement réduit l'épaisseur de la paroi. Cependant,

le contenu de tout conteneur qui a été endommagé ou qui ne peut être traité pour tout autre motif doit être transféré dans un nouveau conteneur.

Sceaux de raccordement

Tous les conteneurs comportent des raccordements et l'intégrité à long terme des sceaux de raccordement est aussi importante que la lutte contre la corrosion pour entreposer l' UF_6 en toute sûreté. En général, toute défaillance des sceaux pourrait entraîner de petites surfaces isolées de contamination dans la mesure où l' UF_6 réagit avec les zones d'humidité ponctuelles pour former des produits de réaction solides et de l'hydrogène sulfuré (HF). Des inspections périodiques devraient permettre de déceler ces produits de réaction solides localisés. L'expérience acquise jusqu'à maintenant montre que la défaillance des bouchons, sceaux, etc., ne représente nulle part un facteur limitant d'entreposage.

Expérience

Une vaste expérience a déjà été acquise au sujet de l'entreposage de l' UF_6 dans des conteneurs en acier placés sur des aires en plein air. Même sans traitement normal de la corrosion localisée, les conteneurs ont conservé leur intégrité structurale depuis plus de 50 ans. C'est dans la Fédération de Russie (Sibérie) que règnent les conditions les plus extrêmes entre le plein ensoleillement et l'enneigement profond, avec des températures qui varient entre $+40^\circ\text{C}$ et -40°C . La Chine dispose de l'entreposage le plus protecteur, les conteneurs y étant placés à l'intérieur, dans des conditions contrôlées, depuis plus de 30 ans. Le traitement des conteneurs qui ont été longtemps entreposés en plein air a commencé autant aux États-Unis qu'au Royaume-Uni. L'expérience de l'entreposage aux États-Unis s'est avérée satisfaisante, dans la mesure où seules quelques fuites mineures ont été recensées.

Déconversion

L'uranium appauvri entreposé sous forme d' UF_6 représente un risque chimique possible, s'il n'est pas géré correctement. Les stratégies possibles de gestion de l'uranium appauvri comprennent donc la déconversion des stocks d' UF_6 en formes stables qui conviennent mieux à la gestion à long terme. Vu leur grande stabilité chimique et leur faible solubilité, les oxydes d'uranium s'avèrent les formes privilégiées dans ce cas. L' UO_2 et l'uranium métal à haute densité sont aussi des formes possibles offrant une grande stabilité à long terme [4].

Une installation à l'échelle industrielle est nécessaire à tout programme important de déconversion. La technologie et les procédés nécessaires ont déjà été mis au point. À l'heure actuelle, il existe seulement une entreprise commerciale (COGEMA, en France) qui poursuit un programme de déconversion de l' UF_6 en U_3O_8 . Le programme repose sur la technique du four de calcination qui a été développée parallèlement à l'installation de diffusion et qui permet de vendre l'HF liquide comme sous-produit. D'autres organisations étudient des techniques similaires ou sont en train de mettre au point des techniques différentes pour déconvertir l' UF_6 en un oxyde stable, en UF_4 , ou en uranium métal. Toutefois, quelle que soit la technique utilisée, la déconversion réduira certes notablement le risque chimique possible, mais elle nuira aussi à l'économie du réenrichissement et retardera la réutilisation de la matière.

Le site d'une éventuelle installation de déconversion devra être choisi en tenant compte de l'état des conteneurs utilisés pour l'entreposage de l' UF_6 et des questions de sûreté du transport. Il est à noter que les techniques de déconversion sont soumises à la confidentialité commerciale.

Entreposage de l' U_3O_8

En règle générale (mais pas dans tous les cas), l'entreposage sous forme d' U_3O_8 , qui est l'oxyde le plus stable, est considéré pour l'entreposage à long terme lorsque l'entreposage continu sous forme d' UF_6 ne convient pas. Cette solution a l'avantage de réduire les risques toxicologiques et écologiques en cas d'accident imputable à une cause extérieure, à la chute d'un avion ou à un incendie. On utilise des conteneurs en acier doux peints qui sont placés dans un entrepôt. À condition que la condensation et l'endommagement de la structure soient évités, il n'existe aucune limite technique à la durée de l'entreposage sous cette forme mais des inspections courantes de la structure du bâtiment et des travaux de maintenance associés sont nécessaires.

Expérience

L'entreposage à grande échelle de la poudre compactée d' U_3O_8 existe en France depuis 1984. Environ 140 000 t d'U sous forme d' UF_6 ont déjà été converties en U_3O_8 . La poudre est contenue dans des conteneurs peints de type DV 70 en acier doux d'à peu près 3 m^3 , qui sont empilés sur trois rangées dans des entrepôts. Les conteneurs sont en train d'être transférés par chemin de fer vers leur nouveau site d'entreposage, à Bessines, dans le centre de la France.

Entreposage des autres composés

D'importants volumes d' UO_3 et d' UO_2 , ainsi que de petites quantités d' UF_4 , ont déjà été entreposés dans des fûts et placés dans des installations d'entreposage. Il n'existe aucune limite technique en vigueur pour la durée de telles installations, à condition d'empêcher le vapoentraînement du fluorure au cours du procédé de déconversion pour éviter la formation subséquente d'HF, ainsi que toute condensation et atteinte à la structure au cours de la manipulation et de l'entreposage. En outre, de l'uranium métal en vrac, qui est la forme la plus compacte pour le stockage, est entreposé depuis longtemps autant dans des conteneurs qu'à l'air libre.

Autres considérations sur l'entreposage

Trois facteurs affectent de façon significative l'entreposage de l'uranium appauvri :

- Sûreté chimique

Le risque toxicologique et écologique lié à l'entreposage de l'uranium appauvri est le plus élevé lorsqu'il est stocké sous forme d' UF_6 et il est lié à l'interaction de ce dernier avec l'humidité pour former de l'HF. La capacité d'une aire de stockage de l' UF_6 peut donc être limitée par les exigences de sûreté chimique en liaison avec la pire « catastrophe » possible tenant compte de l'emplacement du site et de la population locale. Comme le facteur limitant est normalement l'incendie et le risque d'écrasement d'avion, les aires doivent être exemptes de matière inflammable.

- **Sûreté radiologique**

Aucune considération de sûreté liée à la criticité n'est à prendre en compte pour l'entreposage de l'uranium appauvri. La masse de matière normalement concernée requiert néanmoins une prise en compte de la dose de rayonnement reçue par le personnel sur le site et par le public en dehors du site.

Cela peut avoir une influence sur la conception et l'emplacement de l'aire de stockage sur le site et par rapport aux limites du site et à l'utilisation locale des terrains autour du site. Ces facteurs peuvent aussi avoir une incidence sur la conception de tout bâtiment où seront entreposés de l' UF_6 et de l' U_3O_8 , tout métal ou tout autre composé à base d'uranium appauvri.

- **Sécurité**

Bien que la gestion de l'uranium appauvri requière des mesures de protection physique, il ne présente pas de risque de prolifération significatif et ne constitue pas une cible attractive pour les terroristes.

Évacuation définitive

On ne prévoit pas que l'évacuation définitive de l'uranium appauvri soit nécessaire au cours des 70 à 100 prochaines années aussi longtemps que la production d'électricité se poursuivra. Si les réacteurs rapides prenaient une place importante dans les futurs scénarios énergétiques, cette période pourrait être prolongée de façon sensible ou les besoins de stockage de l'uranium appauvri pourraient être réduits. Par contre, la décision d'abandonner la production électronucléaire pourrait abréger cette période. La conception des dépôts définitifs, en particulier la structure géologique spécifique à chaque cas, déterminera en fin de compte les exigences relatives au conditionnement et aux formes chimiques acceptables de l'uranium appauvri.

Plans de gestion actuels

Les principaux exploitants d'installations d'enrichissement sont Eurodif, la Fédération de Russie, Urenco, le Japon et la Chine et les deux détenteurs de réserves statiques, BNFL et la République de Corée, considèrent l'uranium appauvri comme une ressource énergétique future qui exige un entreposage à long terme sous forme d' UF_6 ou sous forme d' U_3O_8 lorsque les contraintes de site ou la politique l'exigent. Les plans actuels de gestion future des pays et organisations qui ont participé à l'enquête figurent au tableau 1. D'autres informations sur les programmes et les plans sont présentés à l'annexe 4.

- **COGEMA/Eurodif** : La politique actuelle de déconversion en U_3O_8 sera poursuivie selon un débit légèrement supérieur à la production actuelle de résidus, réduisant ainsi les stocks d' UF_6 détenus dans les installations existantes. L' U_3O_8 sera entreposé pour une période indéterminée jusqu'à ce que l'on en ait besoin.
- **BNFL** : Le programme actuel de maintenance des conteneurs de type 0236 prendra fin et ces derniers seront transférés vers des aires de stockage en plein air. Des études sont en cours en vue d'élaborer un procédé de déconversion par plasma dans le but de produire de l'uranium métal qui serait entreposé et du fluor élémentaire qui serait utilisé dans l'industrie. Les applications potentielles de l'uranium appauvri seront étudiées en temps utile si elles sont identifiées.
- **Urenco** : Le programme actuel d'entreposage sous forme d' UF_6 , comprenant inspections et maintenance préventive, se poursuivra. Les stocks continueront aussi d'être réenrichis à

condition que cela demeure rentable. Des licences pour un entrepôt d' U_3O_8 ont déjà été délivrées aux Pays-Bas (COVRA) et une demande est en cours de préparation en Allemagne par précaution au cas où ce type de stockage deviendrait nécessaire. Les travaux préliminaires de conception pour la construction d'entrepôts d' U_3O_8 en surface ont commencé.

- Japon : Le plan de base est de poursuivre les utilisations bénéfiques de l'uranium appauvri, mais la déconversion en oxydes est étudiée par JNC pour l'entreposage à long terme.
- Fédération de Russie : Le programme actuel d'entreposage sous forme d' UF_6 , comprenant inspections et maintenance préventive dans chacun des quatre sites, se poursuivra. La stratégie de gestion des réserves d'uranium appauvri est en cours d'élaboration en tenant compte des technologies de déconversion, la forme chimique du produit (UF_4 , oxydes ou métal), de l'entreposage, de la gestion et de l'utilisation de ces stocks, en vue d'une production à grande échelle en 2010. Le financement est susceptible d'être un problème pour l'exécution de ce programme.
- Chine : Le programme actuel d'entreposage sous forme d' UF_6 se poursuivra.
- République de Corée : L'entreposage actuel sous forme d' UF_6 se poursuivra et l'installation de déconversion restera sous cocon. Des applications à petite échelle seront poursuivies, si elles sont rentables.
- Ministère de l'énergie des États-Unis (USDOE) : Le programme de remise en peinture et de remplacement des radiers sera achevé. Une ou plusieurs techniques de déconversion seront choisies et l'emplacement des installations de déconversion sera fixé sur les sites des installations de diffusion gazeuse d'USEC actuellement en service. Ces installations devraient entrer en service en 2005. L'USDOE poursuit un programme visant à déterminer les utilisations bénéfiques de ses stocks avant 2009. Contrairement à la plupart d'exploitants d'installations d'enrichissement, les États-Unis ne considèrent pas ces stocks comme une ressource énergétique pour l'avenir et pratiquent une politique de déconversion vers une forme plus stable, à des fins d'évacuation, tout en explorant les utilisations bénéfiques potentielles de cette matière.

Résumé

L'uranium appauvri issu des installations d'enrichissement peut être entreposé en toute sûreté sous forme d' UF_6 dans des conteneurs gainés d'acier placés dans des aires en plein air, à condition d'empêcher tout contact avec l'eau stagnante, d'inspecter régulièrement les conteneurs et de traiter les défauts localisés qui pourraient conduire à une corrosion.

La capacité des aires de stockage est déterminée par les contraintes spécifiques du site basées sur l'évaluation du risque d'événement catastrophique dû à la toxicité chimique de l' UF_6 et à la dose de rayonnement reçue par les travailleurs sur le site et par la population aux limites du site.

Si la déconversion en une forme plus chimiquement inerte devenait nécessaire ou souhaitable, une technique commerciale éprouvée existe pour produire de l' U_3O_8 . D'autres techniques sont disponibles ou en cours de développement pour produire de l' UF_4 , des oxydes d'uranium ou de l'uranium métal.

Moyennant une maintenance appropriée, ces composés inertes peuvent être entreposés afin d'optimiser économiquement le réenrichissement et permettre d'autres applications au cours des sept à dix prochaines décennies.

V. UTILISATIONS ENVISAGÉES

Un certain nombre d'applications ont déjà été envisagées pour l'uranium appauvri à travers le monde. En général, ces utilisations se répartissent en deux domaines : nucléaires et non nucléaires.

Utilisations nucléaires

Les stocks d'uranium appauvri représentent une réserve importante d'énergie utilisable soit par réenrichissement pour remplacer l'extraction de minerai primaire, soit par mélange avec de l'uranium hautement enrichi pour former de l'uranium faiblement enrichi utilisable dans les réacteurs électrogènes, soit par mélange avec du plutonium pour former du combustible MOX, soit encore pour servir de couverture dans les réacteurs rapides ou de composant mineur dans certains concepts de combustibles pour réacteur à eau ordinaire ou CANDU.

L'uranium appauvri constitue un excellent blindage contre les rayonnements nucléaires et peut donc être utilisé dans les industries nucléaire, médicale et autres où un blindage biologique s'impose. Cet objectif peut être atteint en incorporant des garnitures d'uranium métal appauvri (par exemple du Cermet encastré dans de l'acier), en utilisant de l'oxyde d'uranium appauvri sous forme de granulat dans le béton (*Ducrete*) ou sous forme de composant de matériaux à l'intérieur d'un colis de déchets.

Source d'énergie

Réenrichissement

L'opportunité du réenrichissement de l'uranium appauvri dépend des facteurs économiques. Pour le moment, le réenrichissement n'est rentable que dans les installations de centrifugation qui disposent d'un surcroît de capacité et où les coûts d'exploitation sont faibles. Les réserves actuelles d'uranium appauvri de 1,2 million de tonnes d'U (dont la teneur en ^{235}U est de 0,3 %) fourniraient 336 000 t d'uranium naturel équivalent qui suffiraient pour alimenter les réacteurs nucléaires en service dans le monde pendant cinq ans et laisseraient 864 000 t d'U sous forme de résidus secondaires à une teneur de 0,14%. Les résidus secondaires pourraient être réenrichis pour fournir l'équivalent de 106 000 t d'U supplémentaires, correspondant à 1,5 année supplémentaire d'exploitation des réacteurs, en laissant 758 000 t d'U de résidus tertiaires d'une teneur en ^{235}U de 0,06 %.

La Fédération de Russie a utilisé et continue de faire appel au surcroît de capacité de ses installations d'enrichissement pour réenrichir les rejets d'enrichissement. Toutefois, la construction d'usines spécifiques pour le réenrichissement de ces rejets n'est économique que si le prix d'1 kg d' U_3O_8 plus le coût de la conversion en UF_6 dépasse le coût de l'UTS.

Abaissement de la teneur de l'uranium hautement enrichi

Pour abaisser la teneur de l'uranium hautement enrichi provenant du déclassement des armes nucléaires, il faut utiliser de l'uranium faiblement enrichi (1,5 %) issu des résidus, pour satisfaire les

exigences de l'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) concernant les isotopes mineurs. Pour produire de l'uranium enrichi à 4,4 % (en ^{235}U) en mélangeant de l'uranium enrichi à 1,5 % à de l'uranium hautement enrichi à 90 %, le facteur de dilution est de 30 pour 1.

En utilisant l'uranium faiblement enrichi à 1,5% issu des résidus on réduira les stocks de 30 kg d'U pour chaque kilogramme d'uranium hautement enrichi dont on aura abaissé la teneur. Le facteur de dilution diminue à proportion de la teneur de l'uranium hautement enrichi (par exemple environ 16 pour 1 pour de l'uranium hautement enrichi à 50 % en ^{235}U).

L'utilisation totale potentielle de l'uranium appauvri à cette fin dépend donc de la décision politique qui aura été prise au sujet du déclassé des armes nucléaires à base d'uranium hautement enrichi et de la teneur de cet uranium.

La Fédération de Russie et les États-Unis ont passé un accord intergouvernemental jusqu'en 2013 qui régit l'abaissement de la teneur de 30 t d'uranium hautement enrichi chaque année par la Fédération de Russie. Le programme consommera 900 t d'U/a de résidus.

Combustible à base d'oxydes mixtes (MOX)

Le combustible MOX est un mélange de dioxyde de plutonium et de dioxyde d'uranium. Le dioxyde d'uranium est normalement de l'uranium appauvri. En général, le combustible MOX comprend 6 % de plutonium et 94 % d'uranium appauvri. À l'heure actuelle, les assemblages de combustible MOX peuvent être chargés avec des assemblages de combustible à l'uranium dans les réacteurs à eau ordinaire à raison d'environ 1 pour 2. Ainsi, dans un réacteur de 900 MWe, 16 des 52 assemblages par rechargement seront constitués de combustible MOX. Ces 16 assemblages exigent 390 kg de plutonium et 7 t d'uranium appauvri. D'après les estimations de l'*Uranium Institute*, la demande d'uranium appauvri dans le combustible MOX augmentera jusqu'à environ 340 t d'U/a en 2003, puis se maintiendra à ce niveau [1].

Combustible de réacteurs rapides

Dans un réacteur rapide, le cœur est composé d' UO_2 et de PuO_2 entouré d'une couverture d' UO_2 naturel ou appauvri.

L'*Uranium Institute* a estimé en 1996, que la demande moyenne annuelle des réacteurs rapides était d'environ 100 t d'uranium appauvri s'ils étaient exploités comme surgénérateurs (ce chiffre tenait compte du réacteur *Superphénix* qui est maintenant fermé). Si les réacteurs rapides sont utilisés avec un taux de surgénération égal à un, la demande en uranium appauvri est réduite d'environ 33 % et s'ils sont utilisés pour consommer du plutonium la demande chute de 66%.

La consommation d'uranium appauvri dans les réacteurs rapides devrait rester faible, à moins que ceux-ci deviennent commercialement rentables, ce qui est peu probable avant 2030.

Combustible de réacteur à eau ordinaire et de la filière CANDU [1]

Dans certains types de combustible pour réacteurs à eau sous pression, l'uranium appauvri est utilisé dans des barres de combustible qui contiennent un absorbeur consommable, tel l'oxyde de

gadolinium. Il y a seulement quelques barres de combustible de ce type dans chaque grappe de combustible et seulement la moitié des grappes de combustible comportent de telles barres.

On estime que l'utilisation mondiale totale d'uranium appauvri dans les réacteurs à eau ordinaire s'élève à 5 t/a.

Le cœur initial d'un réacteur CANDU, comprend un certain nombre de grappes d'uranium appauvri qui peuvent remplacer le combustible normal en cas de défaillance. On estime que l'utilisation d'uranium appauvri dans les réacteurs CANDU est de 5 t/a. Ce chiffre devrait rester stable jusqu'en 2010.

Plutonium excédentaire

En septembre 2000, les États-Unis et la Fédération de Russie ont signé un accord bilatéral sur la disposition du plutonium excédentaire par rapport aux besoins de la sécurité nationale. Cet accord prévoit que 34 t de plutonium issues des activités militaires russes seront utilisées dans les réacteurs et que la production du combustible MOX sera lancée en 2007. On s'attend à ce qu'une certaine quantité d'uranium appauvri entre dans la fabrication de ce combustible.

En vertu de cet accord, les États-Unis s'engagent à écouler 2,5 t de surplus de plutonium à teneur militaire en fabriquant du combustible MOX qui sera consommé dans les réacteurs commerciaux pour produire de l'électricité. Les États-Unis comptent utiliser une quantité totale d'environ 700 t d'uranium appauvri entre 2007 à 2019, soit environ 60 t/a, pour fabriquer ce combustible. Ils comptent aussi disposer de 8,5 t de surplus de plutonium en les immobilisant dans une matrice céramique et en les évacuant dans un dépôt de déchets. En outre, environ 4 t de plutonium de teneur inférieure à celle du plutonium de qualité militaire sera évacué après immobilisation, en dehors du cadre de l'accord avec la Fédération de Russie. L'utilisation d'uranium appauvri dans ce cadre serait au maximum de 26 t entre 2007 et 2019, soit environ 2,2 t/a.

Utilisations comme blindage

Matériaux de blindage

Divers matériaux comprenant des granulats d'uranium appauvri (normalement sous forme de dioxydes) incorporés dans une matrice ou mélangés à un liant existant déjà ou ont été envisagés pour produire un blindage très dense. Les matrices qui ont été proposées comprennent des matériaux à base de ciment, de polyéthylène et de graphite. Ces nouveaux blindages offrirait une capacité de protection bien supérieure par unité d'épaisseur et de poids à celle d'autres matériaux moins chers comme le béton ordinaire. Cette propriété pourrait être rentable dans le cas de certaines applications.

Blindage biologique

En radioprotection, l'uranium appauvri assure le blindage contre les rayons X et les rayons gamma. Les produits à base d'uranium appauvri sont utilisés de façon courante pour fabriquer des appareils comme des déflectoscopes gamma, des unités de gammagraphie pour l'essai des matériaux, le blindage des appareils de radiothérapie et des systèmes à diaphragme, des conteneurs de transport et des équipements de recherche ou de médecine qui doivent comporter un blindage biologique sûr pour protéger le personnel.

Le rapport Kapline [5] indique qu'il pourrait y avoir une consommation élevée d'uranium appauvri dans les salles blindées, soit en améliorant le plomb et le ciment dans les salles existantes soit en utilisant de l'uranium appauvri dans les nouvelles salles et dans les salles blindées volantes. Les salles volantes sont louées aux hôpitaux ou sont utilisées pendant la construction d'installations permanentes.

Utilisations dans des dépôts de déchets [5]

Les utilisations potentielles de l'uranium appauvri dans les dépôts de déchets nucléaires comprennent les conteneurs, le remplissage des colis de déchets et l'abaissement de la teneur du combustible de réacteurs à l'uranium hautement enrichi.

Conteneurs : Dans certaines conceptions, les conteneurs doivent protéger le personnel contre les déchets et isoler les déchets de l'environnement. L'uranium appauvri pourrait être utilisé comme matériau de blindage dans les conteneurs. Plusieurs formes de blindage à base d'uranium appauvri remplissent déjà cette fonction, en particulier le *Ducrete* et les cermets à base d'uranium appauvri.

On a déjà proposé [6] que les composants structuraux des colis de déchets de combustible nucléaire usé soient faits d'un cermet comprenant des particules d'uranium appauvri (UO_2 appauvri) encastrées dans de l'acier. La partie externe du colis de déchets comporterait une pellicule anticorrosive choisie spécialement pour maximiser la résistance à la corrosion dans le milieu géologique spécifique. Le cermet d'acier à base d' UO_2 appauvri peut réduire à la fois les risques de criticité nucléaire à long terme dans un dépôt contenant du combustible usé et les rejets de radionucléides en restreignant la source de dissolution du combustible usé, tout en utilisant avantageusement le surplus d'uranium appauvri.

Remplissage des colis de déchets : Les matériaux de remplissage, comme les particules de dioxydes d'uranium appauvri ou les billes de verre de borosilicate à base d'uranium appauvri, pourraient être utilisés dans les colis de déchets. Ces matériaux de remplissage élimineraient les vides afin d'éviter tout écrasement possible du colis de déchets, protégeraient les travailleurs contre les rayonnements, empêcheraient les rejets de radionucléides hors des colis de déchets et amélioreraient les transferts de chaleur provoqués par la décroissance radioactive des colis réduisant ainsi la dégradation thermique des déchets. Il existe cependant encore des réserves techniques au sujet de la pertinence de l'uranium appauvri pour cette application.

L'uranium appauvri peut aussi être utilisé pour maintenir la sous-criticité dans un dépôt de déchets, s'il est présent dans un mélange servant à réduire l'enrichissement du combustible irradié des réacteurs de recherche qui n'a pas été retraité pour des raisons techniques ou économiques.

Utilisations non nucléaires

L'uranium appauvri est une matière peu coûteuse et facilement disponible. Il est très dense, fond à une température élevée, résiste très bien à la traction et se prête à un simple traitement mécanique. Il peut être utilisé pour produire des objets de configuration complexe par moulage ou estampage. Mélangé à de l'acier inoxydable, il résiste très bien à la corrosion.

Contrepoids

Vu sa densité, l'uranium appauvri offre des avantages dans les endroits où les contraintes de volume interdisent l'utilisation de matériaux moins denses. Les faibles rayonnements et la toxicité chimique de l'uranium en limitent néanmoins l'emploi dans les lieux publics où on lui préfère souvent d'autres métaux très denses mais moins toxiques, notamment le tungstène.

Les contrepoids d'uranium appauvri sont utilisés dans l'industrie des transports pour compenser les déplacements de charge de fret ou la consommation de carburant. On étudie aussi la possibilité de les utiliser pour remplacer le plomb dans les ascenseurs, les grues et les chariots élévateurs à fourche. Les contrepoids en uranium appauvri sont aussi utilisés dans les gouvernes (ascenseurs, ailerons) des avions gros-porteurs, ou encore comme amortisseurs de vibrations, contrepoids centrifuges et éléments de gyrocompas.

Filaments d'ampoules

Un petit tube de dioxyde d'uranium a été utilisé pour prolonger la vie des ampoules électriques en éliminant les surintensités transitoires de courant qui se produisent au moment de les allumer.

Industrie pétrolière

L'uranium appauvri peut être fondu dans des formes appropriées, tout en offrant une haute densité et une haute résistance à la traction. Des études sont en cours en vue d'utiliser l'uranium appauvri dans les masses-tiges, les pénétrateurs de puits et les perforateurs de puits utilisés pour le forage des puits de pétrole. Comme l'efficacité est le principal souci dans ce domaine et que la radioactivité naturelle est déjà présente dans les puits de pétrole, l'utilisation de l'uranium appauvri ne soulève pas de problème particulier.

Volants d'inertie pour le stockage de l'énergie

Le rapport Kapline [5] mentionne qu'il existe deux marchés pour les volants d'inertie : les volants portatifs dans les véhicules électriques et les volants fixes dans les centrales électriques. Il est plus probable que l'uranium appauvri soit plus utilisé dans les centrales que dans les véhicules électriques. La haute densité de l'uranium métal appauvri en fait un candidat potentiel pour les volants utilisés dans les dispositifs d'entreposage de l'énergie d'inertie où l'espace est limité.

Catalyseurs

Des travaux de recherche ont aussi été entrepris sur l'utilisation de l'uranium appauvri comme catalyseur pour détruire les produits chimiques organiques volatils dans les débits de gaz d'échappement [7] et il semble que ces catalyseurs soient déjà utilisés dans l'industrie depuis de nombreuses années [8]. D'autres recherches sur l'emploi de dioxydes d'uranium appauvri comme catalyseurs sont actuellement en cours aux États-Unis [9, 10].

Si les catalyseurs d'uranium appauvri devaient entrer en contact avec des matières destinées à devenir des composants de produits commerciaux ou de consommation, il conviendrait de mesurer et de contrôler la contamination éventuelle de ces produits. La recherche en cours sur les supports de catalyseur est susceptible de venir à bout de ce problème.

Semi-conducteurs

Les caractéristiques des oxydes d'uranium pourraient leur permettre d'assurer un meilleur rendement aux matériaux utilisés actuellement comme semi-conducteurs, tels le silicium, qui sont près d'atteindre leur limite théorique. L'application de semi-conducteurs à base d'uranium pourrait comprendre les piles solaires et les générateurs thermoélectriques. Ce type d'utilisation n'a fait l'objet que d'une recherche limitée, basée sur des études bibliographique et, plus récemment, sur des expériences, mais semble prometteuse [9, 11]. Toutefois, des recherches considérables sont nécessaires pour développer des semi-conducteurs à base d'oxyde d'uranium quasi optimaux et pour évaluer leur efficacité et leur rentabilité.

Autres utilisations futures possibles

Il est envisageable d'utiliser l'uranium appauvri comme matériau phosphorescent, dans des piles, pour le stockage de l'hydrogène ou encore comme composant d'alliage en remplacement du thorium qui est utilisé depuis de nombreuses années. Cependant, ces applications n'ont pas encore été étudiées et il n'est pas sûr qu'elles soient praticables ou qu'elles offrent des avantages notables.

Par ailleurs, l'uranium appauvri pourrait aussi servir à produire du fluor. L'acide fluorhydrique, l'hydrogène sulfuré (HF) gazeux et/ou le fluor élémentaire sont des sous-produits de la conversion de l' UF_6 appauvri en oxydes, métal, etc. L'hydrogène sulfuré sert déjà dans les chlorofluorocarbones (CFC) et, entre autres, dans les industries pétrolière, chimique et nucléaire.

Contraintes potentielles pesant sur l'utilisation de l'uranium appauvri

L'utilisation de l'uranium appauvri impose certaines contraintes, dont :

- Toute utilisation de l'uranium appauvri doit être conforme aux principes fondamentaux de radioprotection.
- Chaque pays concerné peut imposer des exigences de traçabilité et de limitation concernant l'évacuation des produits contenant de l'uranium appauvri.
- À sa première utilisation d'uranium appauvri, toute compagnie qui ne manipule pas actuellement des matières radioactives devra apprendre à respecter les obligations d'une vaste réglementation nationale et internationale concernant la production, la manipulation, l'utilisation, l'entreposage, le transport et l'évacuation des matières radioactives.
- Les fabricants doivent être en mesure de faire face aux dangers associés à la pyrophoricité, à la toxicité chimique et à la radiotoxicité de l'uranium appauvri.
- L'utilisation de l'uranium appauvri devra justifier d'importantes économies ou d'avantages techniques notables avant que les fabricants et les consommateurs finals favorisent le remplacement des produits existants ou le développement de nouveaux produits.
- Le public accepte mal les produits de consommation contenant de l'uranium appauvri.

Perspectives d'utilisation pour l'uranium appauvri

À l'heure actuelle, le réenrichissement pour remplacer l'uranium naturel et le mélange à de l'uranium hautement enrichi constitue la principale utilisation de l'uranium appauvri. Bien que cette application crée encore plus d'uranium appauvri à moindre teneur en ^{235}U , le résultat net est une

réduction des stocks et une économie des ressources naturelles. Son ampleur et son opportunité dépendent des facteurs économiques. Les volumes augmenteront seulement au moment où les coûts de l'U₃O₈ fraîchement extrait augmenteront et rendront ainsi le réenrichissement plus économique.

Les autres utilisations de l'uranium appauvri dans le secteur nucléaire comme composant du combustible des réacteurs rapides, des réacteurs à eau ordinaire, des réacteurs CANDU et du combustible MOX continueront à prélever de petites quantités d'uranium appauvri sur les stocks aussi longtemps que ces réacteurs seront en exploitation. La consommation augmenterait de façon importante si les réacteurs rapides se développaient largement au cours des prochaines décennies. À long terme, il se peut que la demande augmente aussi sensiblement à cause des applications prévues dans les dépôts de déchets, ainsi que pour le blindage des châteaux de transport et des salles blindées. À l'exception des applications en énergie nucléaire et en blindage, l'utilisation de l'uranium appauvri est limitée par le manque d'acceptation du public, les problèmes pratiques liés au régime d'autorisation et à la réglementation, et les problèmes de fabrication liés à la pyrophoricité et à la toxicité chimique de ce matériau.

Dans tous les cas, les coûts associés à l'entreposage de l'uranium appauvri devraient être réduits au minimum afin d'optimiser les possibilités de futures applications à faible coût.

Résumé des activités de recherche et de développement

Afin de favoriser d'autres utilisations de l'uranium appauvri à l'avenir, un certain nombre de pays et d'organisations commerciales exploitent des programmes de recherche et de développement. Ces pays comprennent les États-Unis, le Japon, la Fédération de Russie, la République de Corée et la Chine. Les pays qui n'ont pas de programme de recherche précis comprennent la France, le Royaume Uni et l'Allemagne. Un résumé des informations fournies par les pays et les organisations qui ont participé à l'enquête est présenté ci-dessous.

Programmes nationaux

États-Unis

En 1999, le Ministère de l'énergie des États-Unis a lancé un programme de recherche et de développement de portée modeste sur les utilisations de l'uranium appauvri afin d'explorer les usages bénéfiques possible de ce matériau, du fluor ainsi que des conteneurs en acier au carbone vides qui ont servi pour l'entreposage de l'UF₆ et permettre au gouvernement de faire des économies. Les États-Unis effectueront aussi les activités de recherche nécessaires pour assurer l'évacuation directe de ces matières s'il s'avère qu'il n'existe pas d'utilisation possible et rentable. Le but du programme est de mettre au point, avant 2009, des utilisations innovantes qui exigeront des quantités importantes d'uranium appauvri tout en produisant des recettes qui permettront d'alléger sensiblement les coûts pour gérer le reste des stocks.

Les domaines de recherche et de développement qui intéressent de plus près les États-Unis concernent les utilisations potentielles de l'uranium appauvri comme matériau de blindage, composant de dépôt de déchets de haute activité, catalyseur, semi-conducteur ou comme matière phosphorescente.

Japon

L'Institut national japonais pour le développement du cycle nucléaire a entrepris une étude de faisabilité sur l'utilisation de l'uranium appauvri. Outre l'évaluation de son emploi comme combustible des réacteurs surgénérateurs, l'Institut mène une campagne active de recherches sur d'autres utilisations possibles de l'uranium appauvri, par exemple :

- Le blindage des conteneurs d'entreposage et des châteaux de transport des combustibles nucléaires usés.
- Un alliage pour l'entreposage de l'hydrogène, qui pourrait servir à stocker l'énergie s'il est utilisé avec une pile à combustible.
- Une matière magnétique comme substitut de matériaux magnétiques faits de terres rares.
- Une matière faisant partie d'une pile redox et capable de stocker l'énergie électrique.

Fédération de Russie

La Fédération de Russie a instauré un programme ayant pour but de réaliser les activités de recherche et de développement nécessaires pour poursuivre l'entreposage à long terme de l' UF_6 appauvri et se penche actuellement sur la conversion d' UF_6 en d'autres formes en ayant recours au procédé par plasma. L'un des pivots de la recherche russe est de créer un cycle du fluor au sein de l'industrie nucléaire dans le but de ne plus avoir à introduire du fluor frais tout en produisant divers composés de fluor à des fins industrielles comme des produits de substitution du fréon (*khladone*) ou de l'hydrogène sulfuré.

République de Corée

Depuis les années 1980, la République de Corée a entrepris des recherches sur les utilisations possibles de l'uranium appauvri. L'installation qui a été construite entre 1987 et 1991 pour convertir l' UF_6 en UF_4 fonctionne depuis quelques années. L'installation qui réduisait l' UF_4 en uranium métal appauvri depuis 1984 a été déclassée en 1994. Une autre installation travaille l'uranium métal appauvri depuis 1983. Les objectifs de la recherche tendent plutôt vers le développement de conteneurs de blindage radiologique (pour diverses applications spécialisées, notamment les châteaux de transport pour les isotopes à des fins médicales), la mise au point d'une technique de fabrication de combustible nucléaire et la recherche fondamentale sur le combustible de réacteur nucléaire refroidi par métal liquide.

La République de Corée vise aussi à optimiser le type et la configuration d'entreposage de ses stocks d'uranium appauvri. L'objectif est de permettre de transférer les stocks qui sont actuellement entreposés aux États-Unis dans l'espoir de pouvoir les utiliser dans un futur programme de surgénérateur. Le *KAERI* s'intéresse aussi à d'autres utilisations possibles de l'uranium appauvri et recherche donc une technique appropriée pour son entreposage à long terme.

Chine

Le programme actuel de recherche de la Chine se concentre sur l'utilisation de l'uranium appauvri dans les surgénérateurs et ne traite pas de ses autres emplois possibles.

Programmes commerciaux

BNFL

British Nuclear Fuels plc (BNFL) étudie actuellement un procédé de déconversion par plasma pour récupérer le fluor de l'uranium appauvri à titre de fluor gazeux élémentaire de grande valeur et l'uranium métal très dense afin de réduire les volumes d'entreposage au minimum.

COGEMA

COGEMA a conçu et construit une installation qui utilise de l'uranium appauvri sous forme d' UO_2 pour fabriquer du combustible MOX pour les réacteurs européens. Aucune autre application de l'uranium appauvri n'est étudiée pour le moment.

Autres

Aux États-Unis en particulier, de nombreuses petites entreprises indépendantes et de nombreux particuliers font des recherches d'ampleur limitée sur les utilisations potentielles de l'uranium appauvri. À la lecture des registres du Bureau des brevets des États-Unis, par exemple, on peut constater que 10 brevets ont été délivrés en 1999-2000 pour des inventions qui font appel à l'uranium appauvri. Les statistiques correspondantes ne sont pas connues dans les autres pays.

VI. COOPÉRATION INTERNATIONALE

La gestion de l'uranium appauvri relève de la responsabilité de chaque entité (pays et/ou compagnie) qui détient le stock. Les stratégies de gestion des stocks anciens et de la production actuelle d'uranium appauvri sont soumises aux politiques et aux perspectives des pays et des compagnies en matière d'énergie nucléaire. De même, les applications possibles hors du secteur nucléaire dépendent des points de vue des pays sur l'énergie nucléaire et la radioprotection, ainsi que de l'acceptation du public. Certaines questions qui touchent l'uranium appauvri, comme l'entreposage et le traitement à long terme, intéressent et préoccupent tous les pays et toutes les compagnies ayant des stocks. Certains domaines pourraient se prêter à une collaboration internationale avantageuse pour toutes les parties en cause.

Échange d'information sur les meilleures pratiques pour l'entreposage de l'uranium appauvri

Peu importe la stratégie nationale appliquée pour gérer l'uranium appauvri, son entreposage sûr et sécurisé constitue une exigence préalable. À cet égard, une collaboration internationale incluant un échange d'informations et d'expériences sur la gestion des matières afin de réduire au minimum les conséquences sur l'environnement, la sûreté et la santé des travailleurs et de la population locale serait profitable à tous pays concernés.

Recherche et développement sur les applications de l'uranium appauvri

Les activités de recherche et de développement entreprises par les autorités nationales et les compagnies sont résumées au Chapitre 5. Ces activités sont effectuées de façon indépendante.

Les projets de recherche et de développement peuvent être divisés en projets nationaux et commerciaux. Les premiers, tels un dépôt de déchets national, peuvent ne comporter aucun facteur de concurrence, tandis que pour les seconds, notamment dans le secteur de l'énergie et de l'industrie, les possibilités de coopération internationale sont susceptibles d'être entravées par les questions de concurrence. Dans le cas des dépôts de déchets, cependant, des considérations spécifiques au site risquent aussi de limiter la portée d'une collaboration internationale.

Si des applications à grande échelle et commercialement rentables de l'uranium appauvri étaient mises au point, cela bénéficierait aux pays détenteurs de stocks dans la mesure où des quantités importantes de ce matériau pourraient être consommées. Bien que toute utilisation potentielle à grande échelle de l'uranium appauvri à des fins industrielles fasse vraisemblablement intervenir la concurrence et comprenne sans doute des renseignements confidentiels, la collaboration internationale en matière de recherche et de développement, surtout au tout début de la phase de mise au point, devrait s'avérer utile pour favoriser les échanges d'informations et pour réduire au minimum le double emploi.

Traçage et contrôle des applications de l'uranium appauvri

La réglementation spécifique de chaque pays sur les applications de l'uranium appauvri peut imposer certaines contraintes sur son utilisation à grande échelle. L'instauration d'une collaboration internationale devrait être envisagée en vue d'harmoniser la traçabilité et le contrôle des applications de l'uranium appauvri.

Sensibilisation du public

Le public accepte mal l'utilisation de l'uranium appauvri dans les produits de consommation, ce qui nuit à la rentabilité commerciale de ses utilisations non nucléaires. Il serait donc utile de replacer les dangers radiologiques et chimiques dans une perspective juste pour atténuer les inquiétudes du public. Une collaboration internationale est nécessaire dans ce domaine pour savoir comment fournir des informations pertinentes de manière impartiale et transparente.

VII. PRINCIPALES QUESTIONS

Les principales questions soulevées par gestion de l'uranium appauvri sont résumées ci-dessous.

Combien d'uranium appauvri entreposer et pour combien de temps ?

L'uranium appauvri devrait être entreposé aussi longtemps qu'il existe des possibilités réelles ou perçues de l'utiliser de manière rentable. À l'heure actuelle, on sait qu'il peut servir de source d'énergie après réenrichissement, de matériau de blindage, et qu'il a des applications industrielles. Bien que certaines de ces utilisations se fassent actuellement soient susceptibles de se développer à l'avenir, il est nécessaire d'envisager un entreposage prolongé en vue d'utilisations futures déjà connues et/ou éventuellement identifiées au travers des activités de recherche et de développement en cours. La quantité à conserver devrait être définie en fonction du volume prévu d'utilisations futures.

Sous quelle forme entreposer l'uranium appauvri ?

L'uranium appauvri devrait être entreposé en toute sûreté sous la forme la plus économique pour son utilisation future prévue et soumis à la réglementation en matière de radioprotection et toxicologie qui s'applique spécifiquement au site d'entreposage. Au besoin, il existe déjà des techniques de déconversion de l' UF_6 en d'autres formes d'uranium.

Quelles sont les conséquences de l'évacuation définitive de l'uranium appauvri ?

S'il se révélait que l'uranium appauvri n'a pas d'utilisation future, il faudrait envisager son évacuation définitive. Les exigences requises en l'occurrence dépendront des politiques en vigueur et des installations de chaque pays. Une collaboration internationale permettant de partager les informations et l'expérience serait profitable pour tous les pays concernés.

RÉFÉRENCES

1. Uranium Institute (1996), *Depleted Uranium from Enrichment*, London.
2. Communication from Mr. Karel Fouché (2000), AEC, South Africa.
3. NEA/IAEA (2000), *Uranium 1999 Resources, Production and Demand*, ISBN 92-64-17198-3, OECD, Paris.
4. Lawrence Livermore National Laboratory (1997), *Depleted Uranium Hexafluoride Management Programme*, UCRL-AR-124080, Vol.1, rev.2, p.3-6.
5. Kapline Enterprises Inc. (1995), *Depleted Uranium Market Study*.
6. C.W. Forsberg and V.K. Sikka (2000), *Depleted-Uranium-Dioxide Steel Cermet for Spent Nuclear Fuel Waste Packages*, Transactions of the American Nuclear Society, Washington DC.
7. G.J. Hutchings et al. (1996), *Uranium-oxide-based catalysts for the destruction of volatile chloro-organic compounds*, Nature, Vol. 384, p. 341.
8. G.J. Hutchings; J.L. Callahan et al. (1970), Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. Vol 6, p. 134.
9. R.R. Price, M.J. Haire and A.G. Croff (2000), *Potential Uses of DU*, American Nuclear Society 2000 International and Embedded Topical Meeting, Washington DC.
10. S. Dua, M.C. Burleigh, M.J. Haire, E. Myers, and Z. Zang, and M.V. Konduru and S.H. Overbury (2001), *Putting Depleted Uranium to Use: A New Class of Uranium-Based Catalysts*, Waste Management 2001 Symposium, Tucson AZ.
11. T. Meek, M. Hu, and M.J. Haire (2001), *Semiconductive Properties of Uranium Oxides*, Waste Management 2001 Symposium, Tucson AZ.

Annexe I

GLOSSAIRE

Activité spécifique

Activité d'un radioisotope par unité de masse soit de cet isotope soit de la matière dans laquelle il est contenu.

Combustible MOX

Combustible composé d'un mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium. Ce dernier est habituellement appauvri, mais il peut s'agir d'uranium naturel ou légèrement enrichi. Le combustible MOX est utilisé dans les réacteurs à eau ordinaire. Certains isotopes du plutonium, comme le ^{239}Pu et le ^{241}Pu sont fissiles. La teneur de l'uranium appauvri en ^{235}U contribuera aussi un peu à la fission dans le combustible MOX.

Enrichissement

Défini comme l'enrichissement isotopique, autrement dit l'augmentation de la teneur en ^{235}U . C'est le cas, notamment, lorsque l'on passe de l'uranium naturel renfermant 0,711% d' ^{235}U à de l'uranium faiblement enrichi renfermant jusqu'à 5 % de ^{235}U .

Enrichissement par laser

Procédé d'enrichissement d'atomes ou de molécules d'uranium dans lequel un faisceau laser ayant des longueurs d'onde spécifiques excite l' ^{235}U de manière à permettre la séparation de ces atomes ou molécules. À l'heure actuelle, l'enrichissement par laser en est au stade de la démonstration.

Hexafluorure d'uranium (UF_6)

Composé chimique constitué d'uranium et de fluor. Solide à la température ambiante, il devient gazeux à température élevée, se sublimant à 55,6°C à la pression atmosphérique. L' UF_6 réagit avec l'humidité de l'air pour former de l'hydrogène fluoré gazeux. Il est entreposé dans des conteneurs étanches en acier.

Installation de centrifugation gazeuse

Installation d'enrichissement isotopique dans laquelle l'hexafluorure d'uranium (UF_6) sous forme gazeuse est introduit dans des centrifugeuses. Dans le champ de force centrifuge, l' ^{238}U plus lourd est

projeté sur les bords de la centrifugeuse, tandis que l' ^{235}U plus léger est dirigé vers le centre. Par un système d'écoulement interne, il est alors possible de recueillir le produit enrichi à la partie supérieure de l'appareil, alors que les résidus de traitement sont récupérés au fond. L'opération est répétée jusqu'à ce que le niveau d'enrichissement souhaité soit atteint.

Installation de diffusion gazeuse

Installation d'enrichissement isotopique dans laquelle on fait passer l'hexafluorure d'uranium sous forme gazeuse à travers une barrière comportant des trous très fins. L' ^{235}U plus léger diffuse plus rapidement à travers ces trous et le gaz s'enrichit ainsi progressivement. L'opération est répétée jusqu'à ce que le niveau d'enrichissement souhaité soit atteint.

Oxyde d'uranium

Composé chimique d'uranium et d'oxygène. Il existe divers oxydes d'uranium, tels UO_2 , U_3O_8 , et UO_8 . L' U_3O_8 est une poudre noire qui représente l'une des formes les plus stables de l'uranium du point de vue chimique.

Produits de désintégration

Noyaux issus de la décroissance radioactive, aussi appelés produits de filiation.

Radiotoxicité

Propriété d'un radionucléide d'engendrer un dommage à l'organisme, résultant des rayonnements émis, en cas d'ingestion.

Rayonnement alpha

Émission par un radionucléide d'une particule alpha qui se compose de deux protons et de deux neutrons, comme le noyau d'un atome d'hélium. La charge d'un alpha est positive ; il est plus dommageable que la même dose de rayonnement bêta ou gamma, mais une simple feuille de papier suffit à l'arrêter.

Réacteur à eau ordinaire

Filière de réacteur qui utilise surtout des neutrons thermiques (lents) pour engendrer une réaction en chaîne. Les neutrons rapides sont ralentis par collision avec des molécules d'eau, d'où la dénomination. L'eau absorbe également des neutrons et pour compenser cette perte on enrichit l'uranium en isotope fissile, à savoir l' ^{235}U , par rapport à sa teneur naturelle, de manière à obtenir de l'uranium faiblement enrichi.

Réacteur rapide

Réacteur dans lequel la réaction de fission en chaîne est entretenue par des neutrons à haute énergie cinétique (autrement dit, rapides). Il est capable de convertir l' ^{238}U en plutonium (surgénération), ce qui permet de produire une très grande quantité d'énergie à partir d'une faible quantité d'uranium.

Réenrichissement

Enrichissement complémentaire des résidus d'uranium appauvri, généralement ayant une teneur en ^{235}U suffisamment élevée pour que l'opération soit rentable (supérieure, par exemple, à 0,3%), dans le but d'obtenir de l'uranium faiblement enrichi et de l'uranium appauvri d'une teneur encore plus faible en ^{235}U .

Unité de travail de séparation (UTS)

Unité standard utilisée pour les services d'enrichissement, qui mesure le travail nécessaire pour augmenter la teneur en ^{235}U par rapport à celle de l'uranium naturel (0,711 %). En règle générale, elle sert à mesurer la quantité de services d'enrichissement nécessaire pour produire une quantité donnée d'uranium enrichi à partir d'une substance de base spécifique. La capacité des installations d'enrichissement est exprimée en UTS par an.

Uranium appauvri

Uranium dont la teneur en ^{235}U est inférieure à celle de l'uranium naturel, soit 0,711%.

Uranium faiblement enrichi

Uranium enrichi qui contient entre 0,711 et 20% d' ^{235}U . L'uranium faiblement enrichi est utilisé comme combustible dans les réacteurs à eau ordinaire, avec des teneurs en ^{235}U habituellement inférieures à 5 %.

Uranium hautement enrichi

Uranium enrichi dont la teneur en ^{235}U est supérieure à 20 %. De l'uranium renfermant plus de 90 % d' ^{235}U a été produit pour la fabrication d'armes, pour des réacteurs de propulsion navale et pour des réacteurs de recherche. L'uranium hautement enrichi peut être dilué avec de l'uranium appauvri réenrichi pour obtenir de l'uranium faiblement enrichi qui peut servir à la fabrication de combustible nucléaire.

Sources : Uranium Institute (1996), Depleted Uranium from Enrichment, London.

NEA, IAEA, EC (1999), *Nuclear decommissioning: A Proposed Standardised List of Items for Costing Purposes - Interim Technical Document*, OECD, Paris.

Bodansky, D., *Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects*, University of Washington, AIP Press, New York.

Annexe 2

Tableau A2. Installations d'enrichissement en service

Pays	Lieu	Type	Millions d'UTS/a	Date de mise en service
Chine ⁽¹⁾	Shaanxi	Centrifuge	0.5	1999
France	Pierrelatte	Diffusion	10.8	1979 ⁽²⁾
Allemagne	Gronau	Centrifugation	1.1	1985 ⁽³⁾
Japon	Rokkashomura	Centrifugation	1.05	1992 ⁽⁴⁾
Pays-Bas	Almelo	Centrifugation	1.5	1973 ⁽³⁾
	Angarsk	Centrifugation	1.0	1954 ⁽⁵⁾
Fédération de Russie	Novouralsk	Centrifugation	10.0	1949 ⁽⁵⁾
	Seversk	Centrifugation	3.0	1950 ⁽⁵⁾
	Zelenogorsk	Centrifugation	5.0	1964 ⁽⁵⁾
Royaume-Uni	Capenhurst	Centrifugation	1.3	1976 ⁽³⁾
États-Unis	Paducah	Diffusion	11.3	1954
	Portsmouth	Diffusion	7.4	1956 ⁽⁶⁾

- (1) Une installation de centrifugation de 0,5 million UTS/a est en construction à Lanzhou (Chine).
- (2) Groupe Eurodif.
- (3) Partie du Groupe Urenco. Augmentation de la capacité en cours.
- (4) Expansion prévue.
- (5) Préalablement diffusion gazeuse.
- (6) Fin prévue des activités d'enrichissement en juin 2001. Il est prévu de maintenir l'installation sous cocon jusqu'en 2005.

En outre, les projets pilotes suivants sont actuellement en exploitation, en attente or en construction : une installation de diffusion gazeuse de 20 000 UTS/a, en Argentine, une installation de centrifugation de 7 000 UTS/a, au Brésil, et une installation de centrifugation de 5 000 UTS/a, au Pakistan. De plus, il existe un certain nombre d'établissements de recherche et de développement qui ne produisent pas de quantités notables de résidus et dont les capacités de production ne sont pas connues avec certitude.

Source : Base de données sur le cycle du combustible nucléaire (NFCIS) de l'AIEA.

CARACTÉRISTIQUES DE L'URANIUM APPAUVRI

L'uranium appauvri est entreposé principalement sous forme d'UF₆. À la température ambiante, l'UF₆ est un solide incolore d'un poids moléculaire élevé (352) ; sa pression de vapeur est importante, mais inférieure à la pression atmosphérique. Il se transforme spontanément en gaz à la pression atmosphérique dès que la température dépasse 56,4° C, puis en liquide, si on pousse la pression et la température au-delà de 1,5 atmosphère et de 64° C, respectivement. Ces trois phases (solide, liquide et gazeuse) coexistent à 64° C¹.

L'UF₆ est radioactif à cause de l'uranium qu'il contient et la part importante de fluor lui confère une forte réactivité chimique. Les risques chimiques de l'UF₆ sont plus significatifs que ses risques radiologiques. L'UF₆ est une matière très réactive lorsqu'elle se trouve dans des conditions où les espèces stables de l'uranyle (UO₂⁺⁺) peuvent se former ou dans lesquelles il peut agir comme oxydant. Il réagit avec l'eau pour former des produits de réaction solubles, le fluorure d'uranyle (UO₂F₂) et l'hydrogène sulfuré (HF), qui sont très toxiques.

Radiotoxicité de l'uranium appauvri issu des opérations d'enrichissement²

Les caractéristiques radiologiques de l'uranium appauvri découlent des propriétés des trois isotopes de l'uranium naturel (²³⁸U, ²³⁵U et ²³⁴U) et de leurs produits de filiation. L'abondance des isotopes d'uranium varie dans l'uranium appauvri, mais, en règle générale, il renferme 99,6999 % d'²³⁸U, 0,3 % d'²³⁵U et 0,001% d'²³⁴U.

L'uranium appauvri n'offre pas de risque de criticité dans les conditions naturelles. Lors de sa production, l'activité spécifique de l'uranium appauvri est très faible, environ 23 kBq/g, et sa radiotoxicité est faible également, environ 0,033 mSv/g. Quelle que soit la teneur en ²³⁵U de l'uranium appauvri, les produits de filiation apparaîtront avec le temps entraînant un accroissement de son activité et de sa radiotoxicité qui s'élèveront au même niveau que celles de l'uranium naturel, à quantité égale, au bout d'environ 1 million d'années.

Comme les isotopes d'uranium et leurs produits de filiation émettent quelques rayons bêta et gamma, il est nécessaire de contrôler les lieux de travail. Toutefois, les risques radiologiques externes associés à la manipulation et à l'entreposage de l'uranium ne soulèvent pas d'inquiétude particulière sauf si des quantités importantes d'uranium appauvri sont stockées dans des volumes réduits. Qu'il s'agisse des lieux de travail ou de l'environnement, les dangers radiologiques de l'uranium appauvri ressortissent plutôt aux émissions de particules alpha. Cela signifie que la dose de rayonnement interne par ingestion ou inhalation de composés d'uranium est le danger limitant dans la quasi-totalité des cas.

1. IAEA (1994), *Manual on Safe Production, Transport, Handling and Storage of Uranium Hexafluoride*, IAEA-Tecdoc-771, Vienna.
2. Uranium Institute (1996), *Depleted Uranium from Enrichment*, London.

Un problème notable soulevé par le travail de l'uranium appauvri résulte de l'existence de fines particules issues des opérations d'usinage et de broyage qui restent en suspension dans l'air. Il est donc capital de bien ventiler la machinerie, les lieux de travail et le matériel spécial de filtration pour protéger les travailleurs contre les poussières et les particules radioactives qu'ils pourraient inhaler ou ingérer.

Caractéristiques des diverses formes de produits issus de l'uranium appauvri³

Les caractéristiques contrastées des divers produits potentiels issus de la conversion de l'uranium appauvri peuvent avoir des conséquences importantes sur l'acceptabilité de ces produits en matière d'évacuation. Leurs propriétés physiques et chimiques qui concernent le conditionnement, le transport et l'évacuation de chaque produit d'uranium appauvri sont abordées brièvement ci-dessous.

Caractéristiques physiques

Le tableau A3.1 indique les propriétés physiques des produits de déconversion potentiels. Les densités apparentes des composés d'uranium appauvri produits sont beaucoup plus basses que les densités théoriques, car celles-ci sont des valeurs maximales qui ne sont atteintes que dans le cas des formes cristallines ou des monolithes moulés ou frittés. Les densités apparentes de certaines formes varient beaucoup à cause des détails spécifiques du procédé de déconversion, comme le mélange de particules ou la taille des granulats, le niveau de décantation naturelle ou induite, et frittage, ou non, des produits pour augmenter leur densité. Sous réserve d'avoir déterminé les spécifications voulues à l'avance, les densités qui se situent vers le haut des échelles indiquées semblent atteignables. C'est d'ailleurs une exigence préalable d'atteindre une densité plus élevée pour réduire le volume des produits issus de la déconversion de l'uranium appauvri, autres que l'uranium métal, et partant, les coûts de conditionnement, de transport et d'évacuation.

Tableau A3.1 **Propriétés physiques des produits potentiels issus de la déconversion de l'UF₆ appauvri**

Composé	Poids moléculaire	Densité apparente ^a [t/m ³]
Uranium métal appauvri	238	19
UF ₄ appauvri	314	2.0-4.5
UO ₂ appauvri	270	2.0-5.9
U ₃ O ₈ appauvri	842	1.5-4.0

a. Basée sur les données figurant dans Duerksen *et al.* (2000) et Dubrin *et al.* (1997).

Caractéristiques chimiques

Le tableau A3.2 résume les caractéristiques chimiques les plus importantes des divers produits potentiels à base d'uranium appauvri : la solubilité dans l'eau (une forte solubilité accélère le transport par l'eau) et l'altération par suite de leurs réactions avec l'eau.

3. Croff *et al.* (2000), *Assessment of Preferred Depleted Uranium Disposal Forms*, ORNL/TM-2000/161, ORNL, for the USDOE, Oak Ridge, USA.

Tableau A3.2 **Propriétés chimiques de l'uranium et de ses composés dans des conditions ambiantes**

Composé	Solubilité dans l'eau	Réaction chimique
uranium métal appauvri	Insoluble	<ul style="list-style-type: none"> • Réagit lentement avec l'humidité pour former des oxydes en présence de l'oxygène ; l'humidité condensée favorise la production de H₂. • Les réactions peuvent former une surface pyrophorique en l'absence d'O₂.
UF ₄ appauvri	Très peu soluble	<ul style="list-style-type: none"> • Réagit lentement avec l'humidité pour former de l'UO₂ appauvri et de l'HF, puis finalement d'autres oxydes et minéraux.
UO ₂ appauvri	Insoluble	<ul style="list-style-type: none"> • Seule la poudre est pyrophorique au contact de l'air. • Réagit lentement au contact des eaux souterraines oxygénées pour produire davantage d'oxydes et de minéraux stables.
U ₃ O ₈ appauvri	Insoluble	<ul style="list-style-type: none"> • Réagit très lentement avec l'eau oxygénée pour produire davantage de minéraux uranifères stables. • Le produit tend à être surtout une particule fine ou une poudre.

Source : Biwer *et al.* 2000; DOE, *Programmatic Environmental Impact Statement for Alternative Strategies for the Long-term Management and Use of Depleted Uranium Hexafluoride*, DOE/EIS-029, Washington DC, April 1999; Duerksen *et al.* "Selection of optimum storage forms for depleted uranium," Appendix B in Hightower, J.R., and J.R. Trabalka, *Depleted Uranium Storage and Disposal Trade Study Summary Report*, ORNL/TM-2000/10, January 2000.

Métal

L'uranium métal appauvri réagit lentement avec l'humidité dans des conditions ambiantes pour produire des oxydes d'uranium appauvri et de l'hydrogène. La pellicule d'oxyde s'écaille habituellement, permettant ainsi à la réaction de se poursuivre sur une nouvelle surface de métal frais. Les taux de réaction avec l'air sont lents, mais des taux beaucoup plus élevés sont observés dans des conditions anaérobiques saturées. Aucune trace d'hydrogène détectable ne se forme en présence de l'oxygène, sauf si les circonstances favorisent la condensation de l'eau sur la surface du métal et limitent le transport de l'oxygène de la phase gazeuse vers la surface du métal. Il existe un certain nombre de rapports factuels sur des cas d'inflammation de l'uranium en masse qui ont été attribués à la formation de couches d'hydrure d'uranium, par suite de conditions anaérobiques saturées dans les conteneurs d'entreposage [voir par exemple Biwer *et al.* (2000)]⁴. Toutefois, une étude sur le potentiel d'inflammation de l'uranium métal appauvri conclut que l'hydruration n'explique pas de tels événements⁵. De plus, même si les conditions dont on pensait qu'elle provoquent l'hydruration peuvent se produire dans l'environnement des installations d'évacuation aussi bien que d'entreposage

4. Biwer, B.M. *et al.*, "Depleted uranium disposal feasibility assessment," Appendix D in Hightower, J.R., and J.R. Trabalka, *Depleted Uranium Storage and Disposal Trade Study Summary Report*, ORNL/TM-2000/10, January 2000.

5. Epstein, M. *et al.* "On Prediction of the Ignition Potential of Uranium Metal and Hydride," *Nuclear Safety*, 37 (1) January-March 1996.

s'il y a une couche d'eau suffisante pour empêcher le contact de l'oxygène avec la surface métallique, il est peu probable que de telles conditions interviennent dans des climats arides et des sols non saturés.

Tétrafluorure

Le tétrafluorure d'uranium (UF_4) appauvri, qui n'est ni volatil ni hygroscopique, est très légèrement soluble dans l'eau (~40 ppm à température ambiante)⁶. Toutefois, on a observé des ions de fluorure, que l'on présume découler d'HF chimisorbé, évoluant dans l' UF_4 entreposé. L'HF chimisorbé peut cependant être extrait au cours de la production en chauffant le produit à base d' UF_4 appauvri. En outre, l' UF_4 appauvri réagit très lentement avec l'humidité à la température ambiante pour former de l' UO_2 appauvri et de l'HF. S'il n'est pas extrait, l'HF accélère la corrosion des colis.

Dioxyde

Les fines particules d' UO_2 appauvri (poudre) s'enflamment facilement. Toutefois, les granulats, pastilles et monolithes n'ont pas la même propension. Le dioxyde d'uranium appauvri s'oxyde très lentement en d'autres oxydes et finalement en minéraux uranifères stables sous l'action des eaux souterraines oxygénées. Ces transformations font l'objet d'études intensives dans le cadre du projet de dépôt de déchets de Yucca Mountain (Nevada, États-Unis).

Octaoxyde de triuranium

Le comportement chimique de l'octaoxyde d'uranium (U_3O_8) appauvri est très semblable à celui de l' UO_2 appauvri, sauf que la poudre d' U_3O_8 appauvri n'est pas pyrophorique. Toutefois, la production d' U_3O_8 appauvri tend à engendrer des quantités importantes de particules si fines qu'elles ne pourraient sans doute pas être évacuées sans avoir subi un traitement ou un conditionnement complémentaire.

Résumé des observations

Malgré les formes chimiques très différentes que peuvent prendre les produits de conversion de l'uranium appauvri à l'étude, ceux-ci ont foncièrement des caractéristiques analogues en ce qui concerne la gestion des déchets. Tous ont une solubilité dans l'eau qui varie entre faible et très faible, et tous réagissent *très* lentement avec l'eau pour former des produits de dégradation qui sont, en principe, plus stables et qui ont une densité moindre (et donc un plus gros volume). Aucune des réactions ne se produit à un taux qui rendrait ces matières « réactives », dans le sens que l'on donne généralement à ce terme dans le contexte de la gestion des déchets, à l'exception peut-être de la production d'hydrogène ou la pyrophoricité des couches d'hydrures sur l'uranium métal appauvri. Il est peu probable que cela crée un problème important dans un environnement d'évacuation aride. Une seconde exception possible serait la pyrophoricité de la poudre fine d' UO_2 appauvri qui peut être éliminée en spécifiant un granulat plus gros comme produit de conversion.

6. Katz, J. J., *et al.*, *The Chemistry of the Actinide Elements*, Vol. 2, 2nd Edition, Chapman and Hall, New York, 1986.

Annexe 4

PROGRAMMES, ACTIVITÉS ET PLANS RELATIFS À L'URANIUM APPAUVRI MENTIONNÉS PAR LES PAYS ET LES ORGANISATIONS AYANT PARTICIPÉ

CHINE

À la fin de 1999, on estimait que la Chine détenait un stock d'environ 2 000 t d'uranium appauvri sous forme d'UF₆, dont la teneur moyenne en ²³⁵U était de 0,25 %. Il est prévu que ce stock atteigne 16 500 t en 2007.

À l'heure actuelle, l'uranium appauvri est entreposé sous forme d'UF₆ dans des cylindres de 48 pouces (48X) ou de 1 m³. Tous les cylindres sont conservés dans des bâtiments en béton armé. Les cylindres 48X sont alignés horizontalement sur deux niveaux. Le premier rang de cylindres est placé sur une base en béton en forme de selle, tandis que le second repose sur des supports en bois en forme de V. Les cylindres de 1 m³ sont entreposés verticalement en un seul rang directement sur le plancher en béton sans base.

Les bâtiments où l'uranium appauvri est entreposé doivent être conformes à des règles de radioprotection spécifiques (GB8703-88). Ils doivent être munis d'un système de ventilation normal qui renouvelle l'air trois fois par heure, ainsi que d'un autre système de ventilation à double filtre en cas d'accident. Des échantillonnages d'air doivent être prélevés deux fois par mois pour mesurer la radioactivité près de l'exutoire de ventilation.

Les cylindres d'uranium appauvri sont manipulés par des ponts roulants ou des chariots-grues et transportés par des camions ordinaires de 20 t. La fabrication des cylindres 48X et de 1 m³ est conforme aux normes industrielles recommandées (EJ/T350 et EJ/T424, respectivement). Jusqu'à maintenant, aucune défaillance n'a été signalée dans les cylindres. Un cylindre de 1 m³, vieux de plus de 30 ans, a été découpé en morceaux qui ont fait l'objet d'essais et d'inspections. On a trouvé que la surface métallique interne du cylindre était lisse et brillante.

La Chine compte entreprendre des études de faisabilité en vue de convertir l'uranium appauvri en U₃O₈. Une partie de l'uranium appauvri a déjà été réenrichie.

Les autorités chinoises considèrent que l'uranium appauvri est une ressource potentielle pour l'avenir, bien qu'aucune application à grande échelle n'ait encore été décidée. Il pourrait servir à long terme de matière fissile dans les surgénérateurs, par exemple. Un surgénérateur expérimental d'une capacité de 65 MW est d'ailleurs en construction dans le pays et devrait diverger en 2005. Étant donné le développement prévu de l'énergie nucléaire et l'augmentation des stocks d'uranium appauvri, la Chine accordera davantage d'attention aux choix possibles pour écouler les stocks, aux facteurs économiques et aux applications possibles de la matière.

FRANCE

Depuis plus de 30 ans, la France exploite des installations industrielles de diffusion gazeuse pour enrichir l'uranium. Deux installations ont été construites successivement sur le site de Tricastin, dans le Midi de la France. La première, mise en service en 1965, était consacrée à des applications militaires et a été fermée en 1996. Quant à la seconde, elle produit depuis 1979 de l'uranium enrichi dont la teneur en uranium fissile (^{235}U) est inférieure à 5 % et qui est utilisé dans les réacteurs nucléaires civils ; l'installation est aussi connue sous le nom d'installation Georges-Besse et appartient à Eurodif, qui est une filiale de COGEMA à 59,7 %.

Environ 180 000 t d'U sous forme d'uranium appauvri ont été produites en France comme sous-produit de l'industrie d'enrichissement de l'uranium depuis son avènement. La plupart provient d'uranium naturel et sa composition type s'établit comme suit :

- 0,0020 % en isotope 234.
- Entre 0,20 et 0,35 % en isotope 235.
- Aucun isotope 232 et 236.

L'uranium appauvri produit par l'installation de diffusion se présente sous forme d'hexafluorure d'uranium (UF_6) et est placé dans des conteneurs 48 Y qui sont entreposés sur des aires de stockage temporaires situés directement sur le site de production.

Toutefois, la forme chimique de l' UF_6 ne se prête pas à l'entreposage à long terme parce qu'il y a risque de précipitation avec la vapeur d'eau présente dans l'air pour produire des composés d'oxyfluorure d'uranium et provoquer des rejets toxiques d'acide fluorhydrique. L' UF_6 est donc converti en octaoxyde d'uranium (U_3O_8), qui est une forme chimique plus stable, exempte de fluor et capable d'être entreposée plus sûrement et plus économiquement (aires d'entreposage plus petites).

COGEMA convertit l' UF_6 appauvri en U_3O_8 dans son usine « W » adjacente au site de Tricastin. Les principales étapes du processus de défluoration W comprennent l'hydrolyse, suivie par la pyrohydrolyse à l'aide d'un mélange de vapeur et d'hydrogène. Ce procédé a été adapté à l'échelle industrielle depuis 1984 et a déjà permis de convertir environ 130 000 t d'U sous forme d' UF_6 en U_3O_8 . Le fluor est réduit à 70 % en acide fluorhydrique qui est vendu à l'industrie chimique. L' U_3O_8 est compacté (densité : 3 à 4) et conditionné dans des conteneurs DV 70.

Les conteneurs DV 70 sont des cubes d'acier de 3 m³ pouvant contenir 10 t d' U_3O_8 . Ils sont entreposés sur trois niveaux dans des remises modulaires, soit sur le site de production de Tricastin soit à l'installation provisoire spécifique plus éloignée de Bessines, située au centre du pays. Chaque remise modulaire est équipée de dispositifs parasismiques, occupe une surface de 2 600 m² et peut accueillir jusqu'à 2 200 conteneurs DV 70. L'installation provisoire de Bessines a été confirmée par un jugement du tribunal en 1998 et l'entreposage se poursuit depuis. La licence autorise l'entreposage maximal de 199 900 t d' U_3O_8 appauvri sur le site. L'activité massique maximale d'uranium autorisée est $2,11 \times 10^4$ Bq/g d'U.

Pour le moment, COGEMA n'envisage pas de solution d'évacuation définitive pour l'uranium appauvri parce que celui-ci est considéré comme une matière valorisable.

Sa teneur actuelle en ^{235}U demeure d'ailleurs suffisamment élevée pour justifier son réenrichissement en cas de pénurie sur le marché de l'uranium. Le procédé de réenrichissement qui

consiste à faire passer de l'uranium appauvri dans des cascades d'enrichissement est pratiqué couramment à l'installation d'Eurodif.

L'uranium appauvri offre aussi plusieurs autres applications intéressantes possibles qui ont été plus ou moins développées :

- Dans le cycle du combustible nucléaire, il est utilisé comme matrice pour le combustible des surgénérateurs et pour fabriquer du combustible MOX qui est un mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium. COGEMA exploite une installation, appelée « TU 2 » sur le site même de Tricastin où elle convertit l' U_3O_8 appauvri en UO_2 fritté. Environ 130 t d'U sous forme d' U_3O_8 sont actuellement utilisées chaque année comme combustible MOX, mais cette quantité pourrait atteindre 250 t d'U/a à court terme si la capacité de production de la nouvelle installation française MELOX augmente comme prévu.
- Hormis le cycle du combustible nucléaire, l'uranium appauvri peut être exploité pour :
 - Ses qualités physiques (haute densité, forte inertie), notamment dans les quilles de navires et l'équipement militaire.
 - Ses propriétés chimiques (coloration de la verrerie en cristal, composant de certains médicaments homéopathiques).
 - Ses propriétés radiologiques (absorption neutronique), notamment comme barrière de protection des aires d'entreposage d'uranium retraité sur les sites de COGEMA ou comme ingrédient de certains bétons lourds utilisés pour construire les murs d'enceinte des salles de radiographie ou des entrepôts de combustible nucléaire usé, etc.

Vu son faible niveau de rayonnement, l'uranium appauvri ne nécessite que peu de mesures spécifiques de radioprotection. Cependant, par mesure de précaution, il n'existe aucun poste de travail permanent dans les installations où l'on manipule de l'uranium appauvri. De plus, pour éviter toute contamination (principalement par inhalation), les systèmes d'uranium sont tous étanches et le niveau des aérosols dans l'air ambiant est contrôlé en permanence. La dose annuelle intégrée du personnel de COGEMA sur le site de Tricastin est d'environ 0,04 mSv depuis trois ans, c'est-à-dire environ 100 fois moins que les valeurs autorisées.

RÉPUBLIQUE DE CORÉE

La République de Corée ne possède pas d'installations d'enrichissement et ne produit donc pas d'uranium appauvri. Il n'est pas envisagé non plus d'y produire de l'uranium appauvri dans un avenir proche. Toutefois, le pays compte 16 centrales nucléaires en exploitation, tandis que quatre tranches sont en construction et que huit autres sont prévues en 2015. L'enrichissement de l'uranium, qui est nécessaire pour approvisionner les réacteurs coréens à eau ordinaire en combustible, a été confié aux États-Unis ou à la France.

L'uranium appauvri, issu de l'enrichissement sous forme d' UF_6 , est considéré comme une source d'énergie potentielle à long terme. Si des facteurs, comme les coûts d'entreposage, les effets sur l'environnement, les technologies disponibles et autres, le permettent, les autorités coréennes comptent utiliser les stocks d'uranium appauvri afin de compléter les ressources énergétiques du pays qui sont insuffisantes. À cet égard, Le KAERI a d'ailleurs déjà importé 17 cylindres d' UF_6 appauvri des États Unis.

Le KAERI s'intéresse aussi aux autres utilisations de l'uranium appauvri. Dans les années 1980, les activités de recherche ont abouti à l'identification d'applications possibles, y compris la mise au point de conteneurs de blindage pour les matières radioactives. Les installations spécialisées dans la conversion de l'UF₆ appauvri en UF₄ appauvri ou en uranium métal appauvri sont déjà construites et fonctionnent depuis un certain temps.

UF₆ appauvri

L'UF₆ appauvri provient des États-Unis, comme le montre le tableau A4.1. Les stocks qui ont été reçus entre 1979 et 1983 ont servi à produire de l'UF₄ appauvri qui a ensuite été réduit en uranium métal appauvri pour la fabrication de conteneurs blindés pour des matières radioactives. Les autres stocks d'UF₆ appauvri, qui ont été reçus en 1986 et 1988, ont été entreposés sur l'aire de stockage en plein air du KAERI. On estime que les réserves actuelles d'UF₆ appauvri s'élèvent à 184,8 t.

Tableau A4.1 Stocks d'UF₆ appauvri reçus des États-Unis

Année	Quantité [t]	Nombre de cylindres	Type de cylindre
1979	1.4	1	30B
1983	12.5	1	48Y
1986	73.9	6	48Y
1988	110.9	9	48Y
Total	198.7	17	

Des inspections ont permis de déceler des traces de corrosion sur la surface, les vannes, les bouchons et la jupe de certains cylindres. Toutefois, la corrosion n'était pas grave et aucune fuite ne s'est produite. En guise de protection, les conteneurs ont été recouverts d'une couche de peinture spéciale en 1996.

En ce qui concerne le sort des stocks résiduels d'UF₆ appauvri, aucun projet concret n'a encore vu le jour dans la République de Corée. Le KAERI s'efforce toutefois de trouver actuellement une technique d'entreposage à long terme.

UF₄ appauvri

De l'UF₄ appauvri avait été importé (voir tableau A4.2) à des fins de recherche pour mettre au point une technique de fabrication de combustible nucléaire et de conteneurs de protection pour les matières radioactives. En outre, de l'UF₄ appauvri a été produit à partir d'UF₆ appauvri dans l'installation de conversion du KAERI. Maintenant que la majeure partie de l'UF₄ appauvri importé et une fraction de l'UF₄ appauvri produit a été utilisée, on estime qu'il reste 9,6 t d'UF₄ entreposées dans des fûts au KAERI.

Tableau A4.2 **Stocks importés d'UF₄**

Année	Quantité (kg)	Origine
1980	37.9	France
1982	37.9	France
1983	1 334.4	France
Total	1 410.2	

Uranium métal appauvri

Dans la première moitié des années 1980, le KAERI a instauré un programme visant à produire de l'uranium métal à partir de l'UF₄ appauvri. Pendant la durée de ce programme, le KAERI a importé de l'uranium métal appauvri (voir tableau A4.3). Après la mise au point de la technologie de réduction de l'UF₄ appauvri en uranium métal appauvri, une production totale d'environ 1 400 kg d'uranium appauvri a été effectuée de 1980 à 1987. L'uranium métal appauvri a été utilisé sans interruption à des fins de recherche et de développement sur le blindage radiologique et diverses autres technologies de combustible nucléaire.

Tableau A4.3 **Stocks importés d'uranium métal appauvri**

Année	Quantité (kg)	Origine
1979	880.7	Royaume-Uni
1986	1 995.8	États-Unis
1988	997.0	États-Unis
1999	1 002.6	États-Unis
Total	4 876.1	

La quantité résiduelle d'uranium métal appauvri s'élève à environ 1 000 kg. D'autre part, on estime qu'il existe environ 3 800 kg de déchets d'uranium appauvri issus de l'utilisation d'uranium métal appauvri comme matériau de simulation.

Installations

Installation de déconversion d'UF₆ appauvri en UF₄ appauvri

L'installation a été construite de 1987 à 1991 au KAERI. Sa capacité de production d'UF₄ appauvri était d'environ 50 t/a. Le procédé utilisé consistait à réduire de l'UF₄ appauvri à l'aide d'hydrogène gazeux dissocié de l'ammoniac. L'HF gazeux ainsi produit était ensuite lavé avec une solution d'hydroxyde de potassium (KOH). L'installation a été utilisée pour mettre au point les conditions optimales de production de 1992 à 1995. Malheureusement, le gouvernement coréen a décidé d'interrompre les projets liés au blindage des matières radioactives, si bien que l'installation de

conversion d'UF₄ en uranium métal appauvri a été déclassée en 1994. L'installation est donc sous cocon, en attendant que le ministère coréen compétent se prononce.

Installation de réduction d'UF₄ appauvri en uranium métal appauvri

Le KAERI s'est tout particulièrement intéressé à la mise au point d'une technologie visant à fabriquer des alliages d'uranium capables de servir de blindage contre les matières radioactives et à d'autres applications. On a d'abord commencé à produire 100 g par campagne pour développer la technique, puis on a augmenté peu à peu la capacité du matériel. Lorsque le matériel le plus important produisant 100 kg par campagne est entré en service en 1987, les projets que sous-tendaient son exploitation ont cessé. L'installation a été déclassée en 1994. À l'heure actuelle, l'installation sert d'établissement pour la recherche et le développement sur les combustibles des réacteurs de recherche.

Installation de travail de l'uranium métal

Le four à induction a été fourni par la société française CERCA (Compagnie pour l'étude et la réalisation de combustibles atomiques), dans la dernière moitié des années 1970. Les activités de recherche y faisant appel ont commencé en 1983. Les différentes pièces du matériel lié au traitement thermique et au travail mécanique de l'uranium métal ont été achetées en 1984. Les activités de recherche et de développement effectuées dans cette installation comprennent :

- Le blindage des conteneurs de matières radioactives.
- La technologie de fabrication du combustible pour réacteurs de recherche.
- La recherche fondamentale sur le combustible des réacteurs nucléaires refroidis par métal liquide.

Les recherches ont abouti à la fabrication provisoire de quelques blindages de conteneur, ainsi qu'à la fabrication des combustibles pour le réacteur national HANARO, qui est un réacteur polyvalent de recherche et d'expérimentation utilisé pour des expériences d'irradiation. Par ailleurs, des échantillons de poudre de combustible d'alliages d'uranium appauvri, qui ont été produits par atomisation dans cette installation, ont été fournis à BWX Technologies, Inc. (BWXT), aux États Unis, à la CERCA (France) et à la Commission nationale d'énergie atomique (*Comisión Nacional de Energía Atómica – CNEA*) d'Argentine.

Activités de recherches utilisant de l'uranium appauvri

Blindage radiologique de conteneurs

Le réacteur HANARO, qui est capable de fabriquer des radio-isotopes, fonctionne depuis 1995. Il avait commencé à en produire dès cette époque et la production a augmenté progressivement avec le temps. Les chercheurs qui y travaillaient en sont venus à s'intéresser à la fabrication de conteneurs pour radio-isotopes et les activités pour mettre au point un blindage radiologique ont été relancées en 1997, si bien que quelques blindages ont déjà été fabriqués. Pour répondre aux besoins dans le domaine, on compte importer environ 13 t d'uranium métal appauvri en 2001.

Divers développements de combustible utilisant l'uranium métal appauvri pour la simulation

Comme il a été indiqué plus haut, une petite quantité d'uranium métal appauvri a servi à mettre au point divers combustibles, tels le combustible des réacteurs de recherche et des réacteurs nucléaires refroidis par métal liquide. La consommation d'uranium métal appauvri devrait se maintenir.

Résumé

La République de Corée ne possède aucune installation produisant de l' UF_6 appauvri. Toutefois, plusieurs activités ont été entreprises pour identifier les futures applications des matières contenant de l'uranium appauvri. Étant donné le potentiel de l'uranium appauvri comme ressource énergétique dans un avenir lointain, la République de Corée désire conserver ses stocks. À l'heure actuelle, aucune activité de recherche ne porte sur l'entreposage à long terme de l'uranium appauvri. Si les circonstances le permettaient, il est probable que de telles activités de recherche seraient lancées.

JAPON

Le Japon possède une importante quantité d'uranium appauvri résultant des rejets de l'usine d'enrichissement du Centre environnemental de Ningyo-Toge. On considère que les stocks d'uranium appauvri, estimés à environ 2 600 t d'U, sous forme d' UF_6 , représentent une ressource valorisable pour l'avenir, surtout en tant que combustible de surgénérateurs. Jusqu'à ce que des plans existent pour l'employer à d'autres fins, seul l'entreposage de l'uranium appauvri est envisagé pour le moment. Les applications possibles qui intéressent le Japon sont les suivantes :

- Matériau de blindage pour châteaux de transport de combustible usé.
- Alliage pour le stockage de l'hydrogène.
- Application comme matière magnétique.
- Application dans une cellule redox.

Matériau de blindage de château de transport pour le combustible usé

En élaborant les diverses méthodes d'entreposage du combustible usé, il convient de tenir compte de ses propriétés nucléaires, comme l'intensité des rayons gamma, des neutrons, etc. Un château de transport au blindage très efficace est souhaitable contre la haute intensité radioactive du combustible usé. Vu ses propriétés nucléaires, l'uranium offre un très bon blindage contre les rayons gamma. De plus, une fois qu'il a produit de l'hydruure d'uranium, il peut être utilisé comme blindage contre le rayonnement neutronique. On pourrait donc à utiliser de grandes quantités d'uranium comme matériau de blindage dans certains domaines, y compris l'entreposage du combustible usé.

Alliage pour le stockage de l'hydrogène

Les alliages pour le stockage de l'hydrogène font partie des matières fonctionnelles d'un système de stockage de l'énergie à base d'hydrogène qui est utilisé conjointement avec une pile à combustible. Les températures de travail pour le stockage de l'hydrogène et la dissociation de l'uranium sont toutes

deux élevées, de même que sa chaleur de réaction. Il serait donc possible d'utiliser un alliage uranifère dans un système de stockage de l'énergie basé sur la production et le stockage d'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau. Étant donné sa chaleur de réaction élevée, un système de stockage d'énergie électrique piloté par la chaleur de réaction des hydrures peut aussi être envisagé.

Matière aimantée

Les qualités physiques de l'uranium sont grandement influencées par l'électron 5f, qui est l'électron spécifique de la configuration de l'uranium. Comme l'on considère que cet électron altère le magnétisme de l'uranium, la découverte d'un magnétisme d'efficacité élevée dans des alliages uranifères est probable.

Si de tels alliages étaient découverts, ils serviraient de matières de rechange pour les aimants de terres rares. Cependant, l'uranium est une matière radioactive dont l'emploi est limité, notamment comme aimant permanent des synchrotrons, des lasers à électrons libres, etc., qui sont normalement installés dans des zones contrôlées où les matières radioactives sont relativement faciles à surveiller.

L'utilisation d'aimants faits d'alliages uranifères peut être recommandée dans les installations qui ont été désignées comme des zones contrôlées.

Plan de développement pour les aimants d'alliage uranifère de JNC

Les plans de développement de JNC au sujet des aimants d'alliage uranifère sont :

- Découvrir des composés intermétalliques inconnus par des tests métallographiques, après avoir fondu des échantillons d'alliages uranifères.
- Mesurer le magnétisme, si des composés intermétalliques inconnus sont découverts.
- Estimer la structure approximative de toute matière nouvelle utilisable et poursuivre la recherche de composés inconnus.

JNC compte poursuivre ces développements par itération.

Pile redox

La pile redox a été proposée pour entreposer l'électricité à grande échelle. Au Japon, deux piles redox de 200 kWe à base de vanadium sont en démonstration depuis 1996. L'uranium s'est révélé une matière de cellule active, si bien qu'une pile à base d'uranium devrait pouvoir mieux se charger et se décharger que les piles actuelles à base de vanadium¹. La recherche fondamentale sur la pile redox à base d'uranium a donc eu lieu à l'Université Tohoku du Japon. On envisage d'utiliser de l'uranium dans des zones concentriques restreintes comme les centrales nucléaires.

1. T. Yamamura, *et al.*, D24, Réunion annuelle de la Société japonaise d'énergie nucléaire, 2000 (en japonais).

Déconversion en U_3O_8

Le plan de base est de poursuivre l'utilisation bénéfique de l'uranium appauvri, pendant que JNC examine actuellement la question de la déconversion en U_3O_8 en vue de l'entreposage à long terme.

FÉDÉRATION DE RUSSIE

La Fédération de Russie détient des stocks d'uranium appauvri qui sont estimés à quelque 460 000 t d' U^2 . La quasi-totalité, soit environ 98 %, se présente sous la forme d' UF_6 qui est entreposé dans des conteneurs verticaux dans des parcs en plein air. L'état des conteneurs est vérifié régulièrement et des programmes de maintenance préventive sont appliqués en permanence pour assurer l'efficacité de l'entreposage de la matière, surtout dans le cas des conteneurs qui existent depuis plus de 40 ans.

La Fédération de Russie s'est penchée sur plusieurs démarches pour convertir l' UF_6 en des formes plus stables d'uranium appauvri. Un procédé par plasma qui convertit l' UF_6 en U_3O_8 a été mis au point et environ 100 t d' UF_6 ont été traitées. Un autre procédé de conversion fait appel à l'hydrolyse à basse température effectuée en deux temps. Une installation-pilote a été construite ; sa capacité de production est d'environ 50 kg/h. Parmi les autres procédés, qui ont déjà fait l'objet d'expériences, on compte l'utilisation d'oléfines pour produire de l' UF_4 , puis le recours à l'hydrolyse pour obtenir de l' U_3O_8 ou à un traitement au dioxyde de silicium (SiO_2) pour former de l' UO_2 . Les principales applications connues de l'uranium appauvri sont la production de combustible MOX et de combustible de réacteur rapide. Il pourrait servir à d'autres applications, notamment comme élément pour produire de l'hydrogène sulfuré, blindage radiologique, métal lourd pour volants d'inertie et pour la production de certains sorbants spéciaux.

Minatom, le Ministère russe de l'énergie atomique, est en train d'élaborer un programme global définissant la stratégie, les buts principaux et la portée des activités techniques pour l'entreposage, la gestion et la conversion de l' UF_6 appauvri. Le programme est conçu pour une mise en œuvre d'ici 2010.

Le programme s'inspire des lois et normes russes suivantes dans le domaine de l'énergie nucléaire :

- La Loi fédérale sur la protection de l'environnement.
- La Loi fédérale sur la sûreté radiologique des personnes.
- La Loi fédérale sur la santé et le bien-être épidémiologique du public.

Le concept profitera autant des améliorations qui seront apportées aux textes législatifs et normatifs de la Fédération de Russie que de l'harmonisation avec les recommandations internationales.

2. L'estimation est basée sur le rapport de 1996 de l'*Uranium Institute* [1].

La mise en œuvre du programme comprend plusieurs étapes :

- La première étape porte sur la recherche scientifique, la conception technique, l'élaboration d'expériences et l'évaluation économique des diverses solutions pour l'entreposage, la gestion et la conversion d'UF₆ appauvri. La documentation juridique standard correspondante existe déjà.
- La deuxième étape concerne les expériences pilotes pour améliorer la technologie et le matériel utilisés pour la conversion d'UF₆ appauvri : plasma chimique (production d'oxyde mixtes et d'hydrogène sulfuré), réduction à l'aide d'hydrocarbures insaturés (production d'UF₄ et de khladone sans danger pour l'ozone), réduction à l'aide d'hydrogène (production d'UF₄ et d'hydrogène sulfuré), etc.
- La troisième étape consiste à identifier des moyens de produire de l'uranium sous des formes stables qui soient écologiquement sûres, comme le tétrafluorure (UF₄), les oxydes ou le métal.
- La quatrième étape devrait rendre rentable le traitement des stocks d'UF₆.
- La cinquième étape instaurerait un traitement industriel afin de mettre fin à l'accumulation d'UF₆.

ROYAUME-UNI/PAYS-BAS/ALLEMAGNE

L'organisation tripartite Urenco a été créée à la suite d'un accord intergouvernemental, le Traité d'Almelo, qui a été signé en 1970 pour favoriser le développement et l'exploitation du procédé de centrifugation gazeuse pour l'enrichissement de l'uranium à des fins pacifiques. Après la construction et l'exploitation de trois petites installations-pilotes au début des années 1970, deux petites usines commerciales ont été construites à Capenhurst (Royaume-Uni) et à Almelo (Pays-Bas) à la fin de la décennie. D'autres installations modulaires suivirent sur ces sites et, à partir du milieu des années 1980, à Gronau (Allemagne). La capacité de production y est partout en constante progression. Au milieu des années 1990, Urenco a acquis une installation d'enrichissement par centrifugation, qui appartenait au gouvernement britannique, désireux de s'en défaire parce qu'elle ne répondait plus à ses besoins. Plus tôt, le gouvernement britannique avait aussi exploité une installation par diffusion gazeuse d'abord pour satisfaire ses besoins en matière de défense et ceux de son programme énergétique civil à ses débuts.

Les installations d'enrichissement par centrifugation utilisent surtout de l'uranium naturel comme alimentation, bien que de l'uranium appauvri enrichi à une teneur équivalente à celle de l'uranium naturel et de l'uranium retraité aient été utilisés comme alimentation dans l'une ou l'autre des installations. Les résidus produits au cours des premières opérations au Royaume-Uni ont été entreposés en plein air dans des conteneurs verticaux 0236. À l'heure actuelle, on est en train de les nettoyer, de les réenduire et de les transférer à l'intérieur. Le reste des résidus est entreposé dans des conteneurs normalisés 48G or 48Y sur des radiers préparés. Ces conteneurs font l'objet d'inspections périodiques pour déceler tout dommage et les traiter contre la rouille.

Comme les résidus renferment, en général, entre 0,25 et 0,35 % d'²³⁵U, ils représentent un potentiel important de réenrichissement en vue de produire du combustible de réacteur nucléaire. Pour

l'instant, il n'est pas économique de construire de nouvelles installations d'enrichissement en vue de réenrichir l'uranium appauvri. En revanche, là où il y a actuellement surcroît de la capacité de centrifugation, l'option s'avère rentable et certains résidus d'Urenco sont déjà réenrichis.

L'entreposage des résidus sous forme d' UF_6 est sûr pour plusieurs décennies et apparaît comme la méthode la plus économique pour optimiser le potentiel de réenrichissement précoce. À la fin de 1999, 16 000 t d'U étaient entreposées sous cette forme sur les sites d'Urenco. La capacité d'entreposage des sites est parfois restreinte, cependant, par les conditions de la licence ou les exigences réglementaires. Dans ces cas, des précautions sont prises en concevant et en faisant autoriser des installations d'entreposage pour les résidus issus de la déconversion en U_3O_8 . En Allemagne, *Advanced Nuclear Fuels GmbH* (ANF) possède aussi une réserve de 300 t d'uranium appauvri, à Lingen. Au Royaume-Uni, BNFL en détient 30 000 t en tant que ressource future valorisable et poursuit ses recherches sur un procédé de déconversion par plasma pour réduire les coûts d'entreposage associés en récupérant le fluor de l' UF_6 sous forme de fluor élémentaire gazeux, négociable à un prix élevé, et en produisant du métal à haute densité afin de réduire les volumes d'entreposage au minimum. En pareil cas, l'entreposage peut se poursuivre en toute sûreté pendant de nombreuses décennies tout en préservant les occasions de compléter ou de remplacer l'extraction minière de l'uranium naturel dans de futures utilisations du cycle civil du combustible nucléaire.

En Allemagne, l'uranium appauvri pourrait être utilisé dans un dépôt de déchets national, notamment par mélange dans du combustible usé de réacteur de recherche pour en réduire le niveau d'enrichissement.

ÉTATS-UNIS

Programme d' UF_6 appauvri

Depuis une quarantaine d'années aux États-Unis, d'importantes quantités d'uranium ont été traitées par diffusion gazeuse pour produire de l'uranium enrichi à des fins militaires et civiles. De l' UF_6 appauvri a été dérivé comme sous-produit de ce procédé et a été entreposé sur le site de trois installations d'enrichissement de l'uranium. D'anciens stocks d'environ 700 000 t d' UF_6 contenant 476 000 t d'U sont actuellement entreposés sur le site du Ministère fédéral de l'énergie (USDOE), à Paducah (Kentucky), à Portsmouth (Ohio) et à l'*East Tennessee Technology Park* (ETTP), à Oak Ridge (Tennessee) dans quelque 57 700 cylindres en acier.

L' UF_6 appauvri est un solide granulaire stable, mais toxique, dont la majeure partie a déjà été entreposée depuis des décennies. L'âge avancé de certains cylindres en acier qui contiennent l' UF_6 appauvri et la disposition des cylindres à l'origine (parfois trop rapprochés pour en permettre l'inspection ou parfois en contact direct avec le sol, ce qui accélère la corrosion des cylindres) constituent ainsi un danger potentiel pour l'environnement et la sûreté. Bien que l' UF_6 appauvri ne présente pas de menace radiologique importante, il peut engendrer un risque chimique s'il n'est pas géré correctement.

L'objectif du Programme de gestion de l' UF_6 appauvri est de gérer l'inventaire de l'USDOE dans des conditions sûres et efficaces afin de protéger la santé et la sécurité des travailleurs et du public,

ainsi que l'environnement, jusqu'à ce que l'UF₆ appauvri soit utilisé ou traité. Le Programme est divisé en trois sous-activités :

- La surveillance et la maintenance des cylindres.
- La conversion.
- L'utilisation de l'uranium appauvri.

Surveillance et maintenance des cylindres

L'USDOE reconnaît qu'il faudra des dizaines d'années pour convertir tout son inventaire d'UF₆ appauvri. L'autorité américaine continuera donc, pour de nombreuses années à venir, de s'occuper de la gestion à long terme des cylindres d'entreposage actuels et des mesures continues pour en rectifier ou maintenir l'intégrité.

La gestion quotidienne des cylindres d'UF₆ appauvri comporte des activités visant à améliorer au moindre coût les conditions d'entreposage, notamment :

- La collecte et la gestion de données concernant les caractéristiques de l'uranium appauvri et les cylindres, y compris l'étude, la surveillance et la caractérisation de leur corrosion afin de prévoir les attaques corrosives et d'identifier les méthodes anticorrosives.
- La maintenance générale des cylindres et de leur parc de stockage, y compris l'évacuation des déchets (selles en bois, débris de construction et de maintenance, etc.), le remplacement des vannes et le nettoyage des jupes des cylindres, la réinstallation ou le remplacement de leurs plaques signalétiques, la maintenance du système de protection contre l'incendie du parc de stockage, son nettoyage et la maintenance du réseau de drainage.
- L'inspection périodique des cylindres pour assurer leur intégrité. Les cylindres montrant des signes de corrosion accélérée doivent être inspectés tous les ans, tandis que tous les autres doivent être inspectés tous les quatre ans.
- Le réempilement et le réespacement des cylindres pour améliorer le drainage et pour permettre un plus grand nombre d'inspections. Le remplacement, aussi, des cales en bois par des cales en béton pour réduire le taux de corrosion et améliorer la stabilité des rangées de cylindres.
- La remise en peinture des bouts de jupes et des bâtis de cylindres, au besoin, pour arrêter la corrosion.
- La construction de nouveaux parcs en béton pour stocker les cylindres et le remplacement du gravier par du béton dans les parcs de stockage existants en vue d'améliorer les conditions d'entreposage et de drainage, de réaménager l'empilement des cylindres pour réduire leur taux de corrosion et les risques d'endommagement en cours de manipulation, tout en assurant des inspections plus détaillées.
- Le traitement final de l'inventaire actuel de cylindres vides ou de fonds de cylindres ayant servi à l'entreposage d'UF₆ appauvri.
- L'obtention de surconteneurs certifiés du Ministère fédéral des transports en vue de transférer hors du site les cylindres de 48 pouces utilisés pour entreposer l'UF₆.

Conversion

Depuis 1990, le Programme de maintenance de l'UF₆ appauvri a surtout porté sur la surveillance et la maintenance suivies des cylindres. Toutefois, la question de sa gestion à long terme et de son traitement final demeure et soulève même un grand intérêt de la part du Congrès, de l'USDOE, ainsi que des citoyens et des parties prenantes.

Le Congrès américain a formulé ses intentions en ce qui a trait à l'UF₆ appauvri dans la Loi publique 105-204, ratifiée par le Président des États-Unis en juillet 1998. La Loi confie au Secrétaire d'État à l'énergie le soin d'élaborer et de soumettre au Congrès un programme de construction et d'exploitation d'installations pour traiter et recycler l'UF₆ appauvri. Ce programme devra être conforme à la Loi nationale sur la politique environnementale (*National Environmental Policy Act – NEPA*).

Au cours du quatrième trimestre de 2000, l'USDOE a publié un appel d'offres en vue de mettre au point, construire et exploiter des installations de conversion sur ses sites de Paducah (Kentucky) et de Portsmouth (Ohio). Ces installations convertiront les stocks d'UF₆ appauvri de l'USDOE en UF₄, en uranium métal ou en quelque autre forme chimique stable qui se prête mieux au transport, à une utilisation ou un recyclage avantageux, ou encore à l'évacuation définitive. Toute forme de conversion retenue devra obligatoirement comprendre une voie assurée pour le traitement final qui soit acceptable du point de vue de l'environnement. C'est l'entrepreneur responsable de la conversion qui se chargera de la surveillance et de la maintenance des cylindres, aussi rapidement que possible après l'attribution du marché. L'entrepreneur choisi devra également assumer la responsabilité de transporter les cylindres d'ETTP à Portsmouth à des fins de conversion.

Utilisation bénéfique de l'uranium appauvri

L'USDOE a terminé la rédaction d'un projet directeur sur la gestion et l'évacuation des stocks d'UF₆ appauvri, *Draft Depleted Uranium Uses Roadmap*. Dans ce projet, le Ministère de l'énergie caractérise et analyse les différentes voies envisageables pour le traitement final de l'uranium appauvri, fait des recommandations sur les solutions à privilégier, identifie les obstacles sur chacune de ces voies et propose des activités de recherche et de développement, entre autres, pour lever ces obstacles. Le *Draft Depleted Uranium Uses Roadmap* a été soumis à l'examen et aux observations du public au cours du quatrième trimestre de l'année financière 2000. Des observations ont été reçues et sont actuellement intégrées au document. Une fois établie, la version définitive sera approuvée et affichée sur l'Internet.

De plus, l'USDOE a lancé un programme de recherche et de développement pour explorer les utilisations avantageuses potentielles de l'uranium appauvri, du fluor et des cylindres vides en acier au carbone qui contenaient de l'UF₆ appauvri, en vue de permettre au gouvernement de réduire les coûts associés à la gestion de l'UF₆.

Les principaux objectifs du programme sont :

- Soutenir un large éventail d'investissements pour lever les obstacles des voies qui présentent relativement peu de risque et qui utilisent d'importantes quantités d'uranium appauvri dans des aires réglementées affectées à l'entreposage et/ou l'évacuation des matières radioactives.
- Consentir des investissements ciblés pour réduire les obstacles d'un certain nombre d'options qui sont prometteuses pour l'utilisation massive d'UF₆ appauvri, mais où les

utilisations sont plus spéculatives ou nécessitent des investissements faibles avant que l'option puisse être mise en œuvre.

- Faire les investissements nécessaires à éliminer les obstacles à l'adoption d'une solution optimale pour l'entreposage ou l'évacuation à long terme de l'uranium appauvri qui ne peut être utilisé avantageusement ainsi que des dispositifs ayant servi à leur entreposage à la fin de leur vie utile.
- Investir dans des recherches fondamentales et thématiques liées aux utilisations bénéfiques des produits de conversion de l' UF_6 .

S'appuyant sur les premiers résultats du projet directeur (*Roadmap*), certaines tâches ont déjà été entreprises en vue d'utiliser l'uranium appauvri comme matériau de blindage, catalyseur et semi-conducteur.

L'USDOE s'est engagé à promouvoir les utilisations bénéfiques de l'uranium appauvri et des autres matières provenant de la conversion de l' UF_6 appauvri (y compris le fluor et les cylindres d'entreposage en acier au carbone contaminés) pour en tirer des recettes et de faire des économies au gouvernement par rapport à la solution d'évacuation définitive. Toutefois, le gouvernement entend bien veiller à ce que l'évacuation directe demeure possible au cas où il ne serait pas possible de trouver des utilisations bénéfiques rentables et réalistes.

Annexe 5

**MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS
SUR LES AUTRES UTILISATIONS ET LA GESTION DE L'URANIUM APPAUVRI**

Allemagne

M. Wolfgang Thomas
GRS GmbH
Postfach 1328
D-85739 GARCHING

Tel. +49 89 32 004 490
Fax +49 89 32 004 491
E-mail tho@grs.de

Chine

M. Yuansong Liu
China National Nuclear Corporation
Department of Nuclear Fuels
P.O.Box 2102-10
BEIJING 100 822

Tel. +86 10-6853 1390
Fax: +86 10-6853 1355
E-mail liuys@cnncc.com.cn

États-Unis

M. Larry Dewey (*Chairman*)
Office of Nuclear Energy, Science and Technology, NE-20
US Department of Energy
1000 Independence Avenue
Washington, DC 20585

Tel. +1 202 586 4290
Fax +1 202 586 2027
E-mail larry.dewey@hq.doe.gov

M. Robert Price
Office of Nuclear Energy, Science and Technology
US Department of Energy
19901 Germantown Road
GERMANTOWN, MD 20874

Tel. +1 301 903 9527
Fax +1 301 903 4905
E-mail robert.r.price@hq.doe.gov

Fédération de Russie

M. Victor Seredenko
Russian Research Institute of Chemical Technology (RRICT)
33 Kashirskoe Avenue
MOSCOW 115230

Tel. +7 095 324 4050
Fax +7 095 324 5441
E-mail chem.conv@g23.relcom.ru

France

Mme Brigitte Le Motais
COGEMA
Boîte Postale 4
F-78141 VÉLIZY Cedex

Tel. +33 1 39 26 3371
Fax +33 1 39 26 2721
E-mail blemotais@cogema.fr

Mme Marie-Thérèse Ménager
CEA–Direction de la Stratégie et de l'Évaluation
33, rue de la Fédération
F-75752 PARIS

Tel. +33 1 40 56 1719/2927
Fax +33 1 40 56 1514
E-mail marie-therese.menager@cea.fr

Mme Anne Guinot
COGEMA
Boîte Postale 44
F-26701 PIERRELATTE Cedex

Tel. +33 4 75 50 4643
Fax +33 4 75 50 7224
E-mail aguinot@cogema.fr

Japon

M. Ippei Amamoto
Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)
Kamisaibara-son 1550, Tomata-gun
OKAYAMA 708-0698

Tel. +81 868 44 2211
Fax +81 868 44 2566
E-mail amamoto@ningyo.jnc.go.jp

M. Eiji Suzuki
Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)
Kamisaibara-son 1550, Tomata-gun
OKAYAMA 708-0698

Tel. +81 868 44 2211
Fax +81 868 44 2566
E-mail esuzuki@ningyo.jnc.go.jp

M. Osamu Takanobu
Facility Management Division
Ninyo-Toge Environmental
1550, Kamisaibara-mura, Tomada-gun
OKAYAMA 708-0698

Tel. +81 868 44 2211 ext. 6131
Fax +81 868 44 2833
E-mail tentaka@ningyo.jnc.go.jp

Mexique

M. Ruben Ramirez Guerrero
Comision Nacional de Seguridad Nuclear
y Salvaguardias de Mexico
Dr. Jose Maria Barragan, No 779, piso 3
033020 MEXICO, D.F.

Tel. +52 50 95 3232
Fax +52 50 95 3293
E-mail dg1@servidor.unam.mx

République de Corée

M. Chang-Kyu Kim
Korea Atomic Energy Research Institute
P.O.Box 105, Yusong
TAEJON 305-600

Tel. +82 42 868 2309
Fax +82 42 864 1089
E-mail cckim@nanum.kaeri.re.kr

Royaume-Uni

M. Robert J. Gunn
Department of Trade & Industry, Room 108
1 Victoria Street
LONDON SW1H 0ET

Tel. +44 20 7215 2785
Fax +44 20 7215 2843
E-mail robert.gunn@dti.gs.gov.uk

URENCO (Allemagne, Pays-Bas, Royaume-Uni)

Dr. Stephen. J. Baker
Urenco Limited
18 Oxford Road
MARLOW, Bucks, SL7 2NL

Tel. +44 1628 402 254
Fax +44 1628 402 202
E-mail sjb@urencocom

Consultant

Mme Sashi Davies
ZLS Consulting Limited
2 Cherry Walk, Sarrat Lane
RICKMANSWORTH, Herts WD3 6AF
Royaume-Uni

Tel. +44 1923 77 1598
Fax +44 1923 77 3539/1406
E-mail sashimdavies@aol.com

Agence internationale de l'énergie atomique

M. Jor-Shan Choi, (*IAEA Secretary*)
IAEA Nuclear Fuel Cycle Materials–A2626
P.O.Box 100
A-1400 VIENNE
Autriche

Tel. +43 1 2600 22771
Fax +43 1 26007/2600 29598
E-mail j.s.choi@iaea.org

Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire

Dr. Ivan Vera, (*NEA Secretary*)
OECD Nuclear Energy Agency
Nuclear Development Division
Le Seine St-Germain
12, Boulevard des Iles
F-92130 Issy-les-Moulineaux

Tel. +33 1 45 24 1063
Fax +33 1 45 24 1110
E-mail ivan.vera@oecd.org

ÉGALEMENT DISPONIBLE

Publications de l'AEN d'intérêt général

- Rapport annuel 2000* (2001) *Disponible sur le web.*
- Bulletin de l'AEN*
ISSN 0255-7495 Abonnement annuel : FF 240 US\$ 45 DM 75 £ 26 ¥ 4 800
- Brochure de l'AEN* *Gratuit : papier ou web.*
- Le Point sur l'évacuation des déchets radioactifs en formations géologiques* (2000)
ISBN 92-64-28425-7 Prix : FF 130 US\$ 20 DM 39 £ 12 ¥ 2 050
- Programmes de gestion des déchets radioactifs des pays Membres de l'AEN/OCDE* (1998)
ISBN 92-64-26033-1 Prix : FF 195 US\$ 33 DM 58 £ 20 ¥ 4 150

Développement de l'énergie nucléaire

- Données de l'OCDE sur l'énergie nucléaire 2001* (2001)
Bilingue
ISBN 92-64-08707-9 Prix : € 20 US\$ 19 £ 12 ¥ 1 900
- Méthodes d'évaluation des conséquences économiques des accidents nucléaires* (2000)
ISBN 92-64-27658-0 Prix : FF 200 US\$ 31 DM 60 £19 ¥ 3 250
- Business as Usual and Nuclear Power* (2000)
ISBN 92-64-17175-4 Prix : FF 160 US\$ 25 DM 48 £ 16 ¥ 2 850
- Réduction des coûts en capital des centrales nucléaires* (2000)
ISBN 92-64-27144-9 Prix : FF 240 US\$ 38 DM 72 £ 24 ¥ 4 400
- Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)
ISBN 92-64-28521-0 Prix : FF 210 US\$ 31 DM 63 £ 19 ¥ 3 300
- Enseignement et formation dans le domaine nucléaire: faut-il s'inquiéter ?* (2000)
Un rapport de synthèse ISBN 92-64-28260-2 *Gratuit : papier ou Web*
- Uranium 1999 : Ressources, Production et Demande* (2000)
ISBN 92-64-27198-8 Prix : FF 510 US\$ 77 DM 152 £ 48 ¥ 8 100
- L'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable* (2000)
ISBN 92-64-28278-5 *Gratuit : papier ou Web.*
- Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation* (2001)
Sixth Information Exchange Meeting, Madrid, Spain, 11-13 December 2000
ISBN 92-64-18466-X *Gratuit : papier ou Web.*

Bon de commande au dos.

BON DE COMMANDE

Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, 12 boulevard des Iles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
 Tel. 33 (0)1 45 24 10 15, Fax 33 (0)1 45 24 11 10, E-mail: nea@nea.fr, Internet: www.nea.fr

Qté	Titre	ISBN	Prix	Total
Total				

Paiement inclus (chèque ou mandat à l'ordre des Éditions de l'OCDE).

Débitez ma carte de crédit VISA Mastercard Eurocard American Express

(N.B.: Vou serez débité(e) en francs français).

Numéro de carte	Date d'expiration	Signature
Nom		
Adresse	Pays	
Téléphone	Fax	
Mél		

LES ÉDITION DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(66 2001 13 2 P) ISBN 92-64-29525-9 – No. 52056 2001