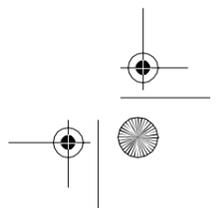
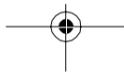
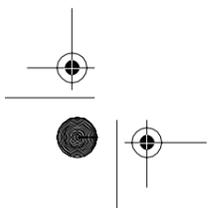
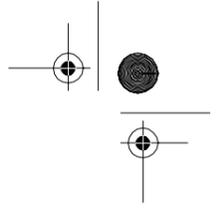
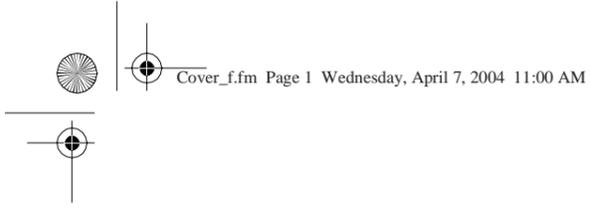


Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables





Développement de l'énergie nucléaire

Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables

© OCDE 2007
NEA n° 6108

AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE
ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements de 30 démocraties œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, 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, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions de l'OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

* * * * *

L'AGENCE 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'OECE. 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 28 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 slovaque, 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 2007

Toute reproduction, copie, transmission ou traduction de cette publication doit faire l'objet d'une autorisation écrite. Les demandes doivent être adressées aux Éditions de l'OCDE rights@oecd.org ou par fax (+33-1) 45 24 99 30. Les demandes d'autorisation de photocopie partielle doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, fax (+33-1) 46 34 67 19, (contact@cfcopies.com) ou (pour les États-Unis exclusivement) au Copyright Clearance Center (CCC), 222 Rosewood Drive Danvers, MA 01923, USA, fax +1 978 646 8600, info@copyright.com.

Crédit photos : Posiva Oy et Mélox.

AVANT-PROPOS

L'objectif principal de l'étude sur les matières fissiles et fertiles recyclables, réalisée sous l'égide du Comité de l'AEN pour les études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC), était de présenter aux décideurs un aperçu des questions les plus importantes soulevées par la gestion de ces matières. L'étude a été menée par un groupe d'experts qui a rassemblé et analysé des données et des informations sur les stocks de matières recyclables et les technologies disponibles ou en développement pour les gérer.

L'étude porte principalement sur les aspects politiques et stratégiques et met l'accent sur les impacts des choix technologiques relatifs aux réacteurs et aux cycles du combustible sur la valeur énergétique potentielle des matières recyclables.

Les conclusions de l'étude mettent en lumière l'importance des matières recyclables dans l'optique du développement futur de l'énergie nucléaire en tenant compte des objectifs du développement durable. Les résultats des analyses montrent en outre que des solutions techniques existent ou sont en développement pour la gestion – recyclage et/ou stockage définitif – de toutes les matières entreposées.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
SYNTHÈSE	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Contexte	9
1.2 Objectifs, portée et démarche de l'étude.....	10
1.3 Contexte de l'étude	10
1.4 Cycle du combustible nucléaire et combustibles fossiles	12
1.5 Autres études pertinentes	14
1.6 Plan du rapport.....	15
Références	16
Sélection de références de l'AIEA	16
2. STOCKS, GESTION ET TENDANCES	19
2.1 Source de matières recyclables	19
2.2 Stocks et contenu énergétique des matières recyclables	20
2.3 Recyclage et gestion des déchets	23
2.4 Solutions et enjeux.....	23
2.5 Impact de l'évolution du cycle du combustible sur le recyclable du plutonium et de l'uranium.....	32
Références	35
3. MODES DE GESTION	37
3.1 Introduction.....	37
3.2 Stockage.....	37
3.3 Recyclage.....	41
3.4 Conclusions.....	47
Références	48
4. INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DES SOLUTIONS DE GESTION	49
4.1 Contexte	49
4.2 Sécurité d'approvisionnement.....	51
4.3 Infrastructures et ressources humaines nécessaires.....	51
4.4 Aspects sociaux.....	52
4.5 Impact environnemental.....	53
Références	54

5. RÉSULTATS ET CONCLUSIONS	55
5.1 Principaux résultats.....	55
5.2 Principales conclusions et recommandations.....	56

Annexes

A. Liste des membres du groupe d'experts.....	57
B. Inventaire des matières fissiles et fertiles recyclables.....	59
C. Scénarios d'évolution de l'énergie nucléaire.....	61
D. Recyclage du plutonium et de l'uranium de retraitement dans un REP : l'expérience d'une compagnie d'électricité.....	65
E. Répercussions environnementales et sanitaires des installations du cycle du combustible nucléaire.....	73
F. Acronymes.....	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Caractéristiques des centrales nucléaires et des centrales thermiques classiques données à titre d'illustration (quantités obtenues pour la production de 7 TWh).....	12
Tableau 2.1 Stocks de matières fissiles recyclables séparées existant à la fin de l'année 2005.....	21
Tableau 2.2 Doses émises au cours des cycles au thorium par rapport aux cycles au MOX REO.	31
Tableau 3.1 Solutions pour l'entreposage du combustible utilisé dans divers pays.....	38
Tableau 3.2 Sections efficaces neutroniques à un groupe.....	42
Tableau 3.3 Valeurs de D pour les actinides mineurs dans des spectres de neutrons thermiques et rapides.....	42
Tableau 3.4 Flux de matières et services par GWe-an pour des cycles du combustible représentatifs.....	47
Tableau 3.5 Principaux paramètres du cycle du combustible comparés à ceux d'un REO MOX standard.....	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Demande totale d'énergie primaire dans le monde (Gtep) Scénario alternatif de l'édition 2006 du <i>World Energy Outlook</i>	11
Figure 3.1 Rendement d'utilisation des ressources en fonction du facteur de conversion.....	44
Figure 3.2 Cycle du combustible fermé.....	45
Figure 3.3 Radiotoxicité des DHA produits dans le cycle ouvert à REO et dans le cycle fermé à RNR.....	45

SYNTHÈSE

L'existence de matières fissiles et fertiles recyclables que l'on pourrait utiliser pour fabriquer du combustible pour les centrales nucléaires actuelles et futures est une caractéristique essentielle que l'énergie nucléaire est pour ainsi dire la seule à posséder. Le choix des modes de gestion de ces matières s'effectue en fonction de deux facteurs principaux : la disponibilité de procédés et moyens permettant de manipuler, d'entreposer et/ou de réutiliser ces matières et finalement de les stocker dans des conditions à la fois sûres, écologiques et rentables ; et l'optimisation de leur valorisation compte tenu de la situation énergétique nationale voire mondiale.

Le présent rapport, qui a été établi par un groupe d'experts *ad hoc* sous les auspices du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC), vise à apporter un éclairage sur les enjeux et intérêts de la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables. Bien que contenant quelques données numériques et informations techniques, l'accent y est mis sur les aspects stratégiques relevant des décideurs, tant au niveau du pays que de l'industrie.

L'étude contient un inventaire des matières fissiles et fertiles existant dans le monde entier établi d'après les données fournies par les participants et des estimations effectuées par le Secrétariat après avoir dépouillé la littérature sur le sujet. Elle montre que les matières qui pourraient être recyclées représentent des quantités d'énergie non négligeables. Si l'on parvenait à surmonter toutes les difficultés et tous les obstacles qui freinent actuellement le recyclage des matières disponibles, on pourrait alimenter pendant près de 40 ans un parc de réacteurs à eau ordinaire (REO) de la génération actuelle d'une puissance installée totale de 100 GWe au moins, c'est-à-dire à peu près la puissance nucléaire installée des États-Unis.

Les matières recyclables recouvrent une diversité de produits qui vont de l'uranium appauvri sortant des usines d'enrichissement, à des stocks de thorium en passant par l'uranium et le plutonium extraits lors du retraitement du combustible usé ainsi que le plutonium et l'uranium hautement enrichi déclarés excédentaires par rapport aux besoins de la sécurité nationale par les États-Unis et la Russie. Les stocks de matières qui ne sont pas traitées dans des usines du cycle du combustible nucléaire sont entreposés sous des formes physiques et chimiques diverses sur différents sites. Dans tous les pays de l'OCDE, il existe une réglementation et des normes strictes concernant le transport, l'entreposage et le traitement de ces matières qui permettent de maintenir leur impact sanitaire et environnemental à un niveau aussi bas que raisonnablement possible.

Une analyse systématique des modes de gestion possibles pour entreposer, réutiliser ou stocker les matières recyclables montre que des solutions techniquement, économiquement et écologiquement viables pour toutes ces matières existent ou sont en cours de développement. L'entreposage de longue durée est un choix qui se justifie à court et moyen terme mais non une solution à long terme. Toutes les options aboutissent finalement au stockage des déchets radioactifs ultimes, mais certaines d'entre elles permettent de réduire davantage les volumes et la radiotoxicité des déchets ultimes que d'autres. Les concepts et tailles de dépôts varient avec les solutions choisies.

L'évaluation stratégique des solutions possibles pour la gestion des matières recyclables doit prendre en compte leurs aspects économiques, environnementaux et sociaux dans une analyse globale guidée par la recherche du développement durable. Avant toute décision dans ce domaine il convient d'identifier les mesures irréversibles qui fermeraient la voie à d'autres solutions ultérieurement. D'une manière générale, la réversibilité est souhaitable dans la mesure où elle offre la possibilité de reconsidérer les solutions par la suite, pour tirer parti du progrès technologique et de l'évolution du paysage socio-économique.

L'énergie susceptible d'être récupérée des matières fissiles et fertiles recyclables varie dans des proportions considérables en fonction du mode de recyclage qui sera choisi et des stratégies adoptées pour sa mise en œuvre. On pourrait réduire de moitié la consommation d'uranium frais dans des systèmes nucléaires de la génération actuelle en retraitant le combustible usé puis en recyclant l'uranium et le plutonium ainsi récupérés au lieu d'adopter un cycle ouvert. Les systèmes avancés, en particulier ceux qui reposent sur des réacteurs à neutrons rapides, permettraient de multiplier par plus de 50 l'énergie produite par tonne d'uranium naturel et faciliteraient le recyclage des actinides mineurs.

Les facteurs déterminants, lorsque l'on compare les solutions de gestion des matières recyclables, sont essentiellement d'ordre stratégique, social et environnemental. Des aspects tels que la sécurité d'approvisionnement énergétique, le fardeau de la surveillance des matières imposé aux générations futures et la résistance à la prolifération pèsent nettement plus lourd dans l'évaluation des solutions en concurrence que des variations du coût du cycle du combustible qui, aujourd'hui, représente de toute façon moins de 20 % du coût total de l'électricité produite dans les centrales nucléaires.

Toutes les solutions envisageables pour la gestion des matières recyclables exigent des infrastructures spécifiques qu'il pourrait être difficile de mettre en œuvre, de financer et d'exploiter au niveau national en particulier dans les pays dotés de programmes électronucléaires modestes. La collaboration internationale pourrait apporter des solutions globalement meilleures, abaisser les coûts et améliorer tant l'efficacité que la résistance à la prolifération.

Bien que certaines des options possibles pour la gestion des matières recyclables aient atteint la maturité technique et industrielle, des études et recherches sont nécessaires pour mettre au point des approches plus avancées et améliorer les performances des solutions déjà en place. Des collaborations bilatérales et multilatérales pourraient faciliter la recherche dans ce domaine et accélérer la conception et la mise en œuvre de solutions efficaces au niveau planétaire.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Après plusieurs dizaines d'années d'exploitation commerciale de centrales nucléaires pour produire de l'électricité, des quantités importantes de « sous-produits » contenant des matières fissiles et/ou fertiles se sont accumulées dans le monde entier. En outre, la Fédération de Russie et les États-Unis ont déclaré qu'une partie des matières utilisées préalablement à des fins militaires dépassent les besoins de la sécurité nationale et peut donc être affectées à des applications civiles.

L'idée d'utiliser ces produits en les recyclant est venue très tôt. C'est pourquoi l'on a d'ores et déjà consacré d'importantes études et recherches à la faisabilité technique du recyclage de certaines matières fissiles, notamment le plutonium et les actinides mineurs.

D'autre part, la plupart des pays exploitant l'énergie nucléaire ont étudié les possibilités de stocker les substances radioactives y compris celles qui peuvent être recyclées et ont développé des concepts de dépôts visant à offrir des solutions sûres et fiables protégeant efficacement la santé humaine et l'environnement.

Le recyclage est déjà une réalité industrielle dans certains pays pour certaines matières mais n'est pas encore largement répandu. Lorsque l'on étudie les différents scénarios d'évolution de l'énergie nucléaire, il importe d'évaluer les possibilités offertes par le recyclage des matières fissiles et fertiles en termes d'économie et de gestion des ressources, mais aussi en fonction de la dimension sociale du développement durable.

Le développement durable a pour objectif, entre autres, de préserver les ressources naturelles. À cet égard, le recyclage est un moyen évident d'utiliser plus efficacement des ressources naturelles limitées non renouvelables et donc d'améliorer la « durabilité » des systèmes nucléaires. Dans l'optique d'une relance des programmes électronucléaires dans le monde qui pourrait se traduire par une hausse spectaculaire de la demande de combustible nucléaire et de dépôts de déchets radioactifs, le recyclage des matières fissiles et/ou fertiles est une solution particulièrement intéressante pour améliorer le rendement global du cycle du combustible nucléaire.

Dans ce contexte global, la présente étude sur la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables a été entreprise sous l'égide du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC). Elle a été menée par un groupe d'experts *ad hoc* des pays membres. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) y a participé et a fourni des données et informations sur les pays non membres de l'OCDE. Le groupe s'est réuni à quatre reprises entre le mois de septembre 2005 et le mois de novembre 2006 pour successivement cerner le périmètre de l'étude, recueillir et analyser les données et rédiger ce rapport.

1.2 Objectifs, portée et démarche de l'étude

L'étude a pour finalité globale d'étudier les aspects stratégiques du recyclage ou non de matières fissiles et fertiles. L'analyse couvre les aspects scientifiques, techniques et économiques du recyclage mais l'accent est mis sur les sujets intéressant les décideurs. Les analyses présentées dans ce document sont le fruit de la réflexion du groupe d'experts chargé de l'étude et s'appuient principalement sur les données et informations fournies par les participants. De plus, chaque fois que cela se justifiait, les résultats et conclusions d'ouvrages parus précédemment, y compris les publications récentes de l'OCDE/AEN et de l'AIEA ont été utilisés.

Le développement durable sert d'arrière-plan pour évaluer les avantages et inconvénients des différentes stratégies de gestion des matières recyclables. Ces options et stratégies ont été analysées en s'intéressant tout particulièrement à la façon dont le recyclage offre une solution satisfaisante pour résoudre les aspects économiques, sociaux et environnementaux du développement durable.

Le groupe est conscient que les circonstances nationales particulières sont des facteurs déterminants pour le choix des options du cycle du combustible. C'est pourquoi l'étude s'est donné pour objectif de mettre en évidence les principaux problèmes soulevés par les différentes options de gestion des matières recyclables plutôt que de procéder à une évaluation comparative de ces options.

L'étude recouvre toutes les matières fissiles et fertiles susceptibles d'être recyclées, c'est-à-dire :

- le combustible usé (déchargé des réacteurs de puissance commerciaux) ;
- l'uranium appauvri (rejets des usines d'enrichissement) ;
- l'uranium recyclé (issu du retraitement du combustible des réacteurs de puissance commerciaux) ;
- les matières démilitarisées décrétées excédentaires par rapport aux besoins de la sécurité nationale par la Fédération de Russie et les États-Unis ;
- le plutonium (tiré du retraitement du combustible des réacteurs de puissance commerciaux) ;
- les stocks de thorium.

Les informations fournies par les experts de même que les données recueillies par le Secrétariat ont servi de base pour l'analyse quantitative des substances recyclables disponibles. Les statistiques que les pays membres ont fournies au Secrétariat de l'AEN pour la rédaction du Livre brun (AEN, 2006a) et du Livre rouge (AIEA et AEN, 2006) ont été utilisées le cas échéant, et l'AIEA a fourni des statistiques sur les pays non membres de l'AEN qui proviennent de ses bases de données.

Les experts des différents pays qui ont participé à l'étude ont en outre fourni des informations qualitatives sur la situation dans leurs pays respectifs, notamment sur les politiques concernant l'énergie nucléaire et les options du cycle du combustible.

1.3 Contexte de l'étude

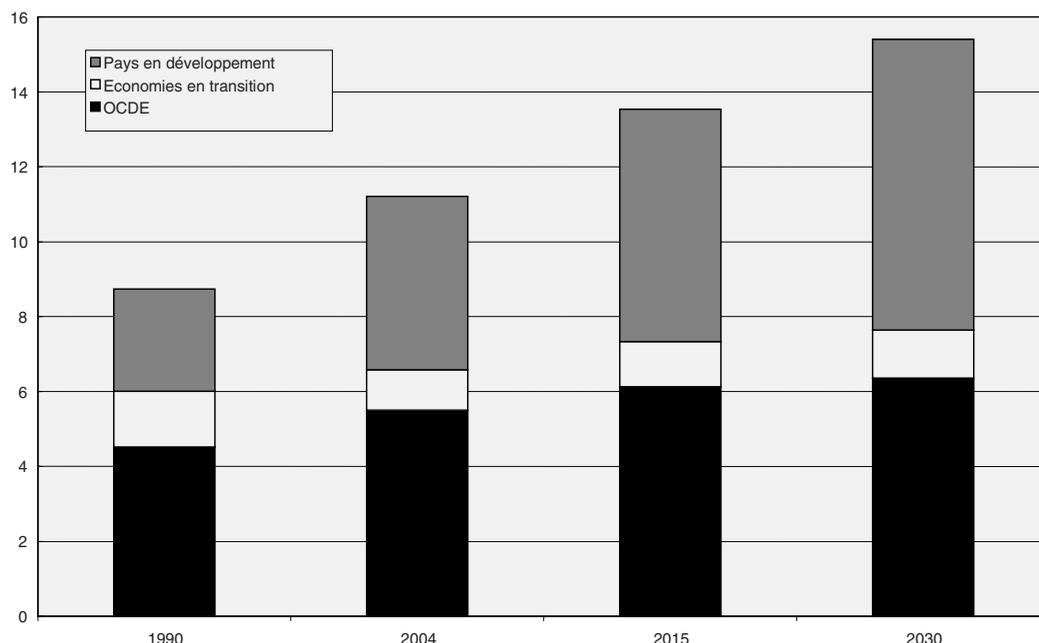
Étant donné la situation actuelle de l'offre et de la demande d'énergie et le fait que de nombreux pays reconsidèrent le rôle de l'énergie nucléaire, il paraissait opportun d'étudier les différentes options de gestion des matières recyclables. D'après toutes les études internationales récentes (voir par exemple AIE, 2006), la demande d'énergie devrait continuer de croître dans le monde entier, même si les analystes appellent à insister toujours plus sur l'efficacité énergétique dans les politiques nationales. Du côté de l'offre, l'énergie nucléaire attire l'intérêt pour des raisons de sécurité et environnementales.

Dans ce contexte, il importera toujours plus de gérer les matières recyclables de manière judicieuse. Comme par ailleurs, plus l'on produira d'électricité nucléaire et plus les volumes de ces matières augmenteront, il faudra aussi les gérer en toute sécurité si l'on veut respecter les impératifs du développement durable. En outre, l'énergie qu'elles contiennent pourra un jour devenir un atout majeur, exploitée en complément des ressources naturelles, pour s'assurer un approvisionnement fiable en combustible nucléaire à long terme.

Bien que les prévisions laissent entrevoir une progression modeste de la demande d'énergie dans les pays membres de l'OCDE et le maintien pendant des décennies encore de la demande des économies en transition en dessous des niveaux de 1990, la croissance économique rapide des pays en développement entraînera la demande totale toujours plus haut. En Asie et en Amérique du Sud notamment, la demande d'énergie devrait croître régulièrement avec la démographie et l'industrialisation.

Les scénarios établis pour l'édition 2006 du *World Energy Outlook* de l'AIE illustrent bien le type d'évolution de la demande d'énergie que les analystes prévoient. Le scénario alternatif aboutit à une hausse de 1,6 %/an de la demande totale d'énergie dans le monde jusqu'en 2030 et le scénario alternatif, dans lequel on fait l'hypothèse de l'adoption d'un arsenal complet de mesures pour limiter la demande, donne une hausse de la demande de 1,2 %/an (voir figure 1.1).

**Figure 1.1 Demande totale d'énergie primaire dans le monde (Gtep)
Scénario alternatif de l'édition 2006 du *World Energy Outlook***



La sécurité d'approvisionnement énergétique préoccupe les décideurs en particulier dans les pays membres de l'OCDE qui disposent de ressources naturelles en quantités limitées. Plusieurs interruptions de la production et menaces concernant les quantités livrées par les principaux producteurs ont créé des tensions sur les marchés mondiaux qui se sont traduites par une hausse des prix des combustibles fossiles, en particulier des hydrocarbures. Par ailleurs, l'utilisation de combustibles fossiles produit inévitablement du dioxyde de carbone qui fait partie des émissions anthropomorphiques considérées par la plupart des experts comme responsables du réchauffement de la planète. Ces deux motifs de préoccupation, à savoir la sécurité d'approvisionnement et le changement

du climat de la planète, ont incité de nombreux pays de l'OCDE à s'intéresser de nouveau à l'énergie nucléaire, une source d'énergie électrique sûre, rentable et non polluante.

Dans les évaluations d'impacts sur l'environnement, les émissions de dioxyde de carbone ne sont pas le seul indicateur utilisé. Il faut prendre en compte la quantité de combustible que consomment les différents types de centrales électriques pour produire une quantité donnée d'électricité, en plus des quantités de gaz à effet de serre et autres gaz éventuellement polluants et des quantités de déchets solides. De nombreuses études exhaustives publiées comparant les divers modes de production de l'électricité en fonction de toutes formes de pressions sur l'environnement ; l'étude ExterneE est une référence en la matière (EC, 1995 et 1999).

Le tableau 1.1 présente une comparaison qui se limite aux consommations annuelles de combustible, aux émissions de CO₂ et à la production de cendres de centrale de 1 000 MWe fonctionnant avec un facteur de charge de 80 %, c'est-à-dire produisant 7 TWh/an. Cette comparaison a été établie d'après des quantités moyennes représentatives des centrales modernes. Ces statistiques se rapportent uniquement à la combustion/consommation du combustible sur le site de la centrale. On n'y a pas inclus les quantités et émissions correspondant à des activités préalables à la combustion qui ont lieu sur un autre site, c'est-à-dire sur le site d'extraction minière ou au cours du transport du combustible.

Les données présentées ont été arrondies et correspondent à des valeurs représentatives destinées à illustrer l'impact relatif de la production d'électricité par différents combustibles fossiles comparé à la production d'électricité nucléaire. Les combustibles d'origines géographiques différentes possèdent des caractéristiques différentes qui déterminent la quantité spécifique de combustible nécessaire et la quantité spécifique de dioxyde de carbone rejeté et de cendres produites. Pour tenir compte de la variabilité des sources de combustible dans le monde, on peut appliquer grossièrement une marge de plus ou moins 25 % aux données sur le minerai d'uranium et sur les combustibles fossiles.

Tableau 1.1 Caractéristiques des centrales nucléaires et des centrales thermiques classiques données à titre d'illustration (quantités obtenues pour la production de 7 TWh)

Type de combustible	Quantité de combustible (tonnes)	Quantité de CO ₂ rejeté (tonnes)	Quantité de cendres produites (tonnes)
Houille	3 500 000	7 200 000	280 000
Pétrole	1 700 000	5 000 000	35 000
Gaz naturel	1 600 000	4 000 000	Petites quantités
Uranium-REP		0	Très petites quantités
Minerai	50 000		
U ₃ O ₈	200		
U enrichi	30		

1.4 Cycle du combustible nucléaire et combustibles fossiles

La production d'électricité dans des centrales thermiques classiques exige une source de chaleur. Dans le monde entier, la grande majorité de ces centrales brûlent à cet effet des combustibles fossiles tels que charbon, le gaz naturel ou le pétrole. Dans le cas des centrales nucléaires, la chaleur vient de la fission contrôlée de matières fissiles, l'uranium et le plutonium notamment. Ces deux types de centrales se différencient très nettement par leur combustible ou cycle du combustible. La possibilité

de recycler le combustible usé déchargé de la centrale après un premier passage en réacteur est une spécificité des systèmes nucléaires.

Aux niveaux de leur préparation, de leur consommation et de leurs effets sur l'environnement, les combustibles nucléaires et fossiles sont aussi très différents. Quel que soit le type de combustible fossile, son cycle a une durée assez courte qui se mesure en semaines ou en mois. Le cycle nucléaire, au contraire, est assez long et il faut plusieurs étapes pour produire un assemblage combustible que l'on pourra installer dans un réacteur. Ces étapes amont durent de deux à trois ans.

La grande majorité des centrales nucléaires exploitées aujourd'hui dans le monde consomment de l'uranium qui a été traité de façon à en augmenter la teneur en ^{235}U . Avant ce procédé d'enrichissement, le minerai d'uranium est extrait et concentré dans le pays d'origine à la suite de quoi le concentrat (ou oxyde d'uranium U_3O_8) est transporté à destination d'une usine où il est converti et enrichi. L'étape consécutive à l'enrichissement consiste à fabriquer un assemblage combustible qui va passer environ trois à quatre ans dans le réacteur où il produira de la chaleur avant d'en être retiré et remplacé par du combustible neuf.

Lorsqu'on brûle un combustible fossile, on en épuise totalement le contenu énergétique. Tout ce qui reste est un déchet. En revanche, à sa sortie du réacteur, le combustible nucléaire « usé » contient des matières qui peuvent être recyclées pour produire davantage d'énergie et seuls quelques pour cent de ce combustible usé sont un véritable déchet. La plus grande partie de ce combustible usé, à savoir 90 %, est constituée d'uranium non consommé, auquel il faut ajouter un petit pourcentage d'un combustible nucléaire artificiel, le plutonium.

Autre différence majeure entre les combustibles fossiles et les combustibles nucléaires, leurs caractéristiques économiques. Si le coût en capital et la durée de construction d'une centrale nucléaire sont supérieurs à ceux d'une centrale thermique classique, le coût du combustible nucléaire, par contre, représente une composante nettement plus faible du coût total de la production d'électricité. Globalement, le coût du combustible fossile représente de 40 à 80 % du coût total de production de l'électricité tandis que celui du combustible nucléaire ne dépasse pas 20 % du total. Dans un monde où les prix des combustibles fossiles sont particulièrement fluctuants et augmentent à grande vitesse, l'option nucléaire possède de ce point de vue un avantage stratégique à long terme.

Brûler des combustibles fossiles provoque instantanément un dégagement de chaleur qui s'accompagne de la libération de divers gaz parmi lesquels les plus dangereux pour l'environnement sont le dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre, et le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote qui sont eux à l'origine des pluies acides et du smog. Ces gaz sont immédiatement rejetés dans l'atmosphère généralement par une cheminée de grande hauteur.

Le procédé de combustion génère par ailleurs des déchets solides sous forme de cendres dont certaines sont éliminées avec les gaz mais dont la plupart se déposent à la base de la chaudière d'où elles doivent ensuite être retirées. Le charbon produit de loin la plus grande quantité de cendres ; le pétrole en produit moins et le gaz beaucoup moins. Une petite proportion de ces cendres est recyclée dans des matériaux de construction, mais la plus grande partie est considérée comme un déchet et enfoui.

Le combustible nucléaire, pour sa part, doit être traité après son passage en réacteur. Le combustible nucléaire usé peut être traité pour en récupérer les substances réutilisables ou entreposé le temps nécessaire à son refroidissement avant d'être stocké après un conditionnement adapté. La possibilité de choisir entre deux options permet aux décideurs de concevoir et d'appliquer la solution qui est la mieux adaptée à leurs contextes et objectifs particuliers.

S'ils choisissent le recyclage, la matière fissile doit être séparée de la petite quantité de déchets contenue dans le combustible déchargé. Des procédés chimiques ont été mis au point et perfectionnés à cet effet ces cinquante dernières années. Ces procédés sont désignés par le terme général de retraitement. Lorsque le retraitement est entrepris sans différer, le cycle du combustible est normalement qualifié de fermé. Ce retraitement permet de récupérer l'uranium et le plutonium pour les recycler ; les déchets fortement radioactifs qui existent en petite quantité peuvent être, elles, traitées, entreposées et finalement stockées dans des conditions sûres.

Si l'on choisit de ne pas recycler, il est possible d'entreposer en toute sécurité le combustible utilisé sur des périodes assez longues. Des solutions techniques diverses ont été mises au point pour conditionner le combustible utilisé de façon à pouvoir le stocker directement dans des formations géologiques stables. Cette option de gestion du combustible utilisé porte le nom de cycle du combustible ouvert. Le fait que l'on puisse entreposer sur de longues périodes le combustible utilisé en toute sécurité n'interdit pas de passer ultérieurement d'un cycle ouvert à un cycle fermé. C'est seulement lorsque l'on stocke le combustible utilisé conditionné sans avoir l'intention de le récupérer que l'on se ferme cette voie.

En dehors de cette capacité de recycler les matières fissiles, certaines filières de réacteurs nucléaires permettent de transformer des atomes fertiles en atomes fissiles utiles qui peuvent alors servir à produire de l'électricité. Par exemple, en bombardant de l' ^{238}U par des neutrons, on obtiendra du ^{239}Pu . De même, on peut produire de l' ^{233}U en irradiant du thorium. Les réacteurs à neutrons rapides, déjà exploités dans plusieurs pays, et les réacteurs au thorium, qui existent sur le papier, sont des exemples de systèmes ayant un potentiel de surgénération.

La capacité de recycler les matières fissiles dans le cycle du combustible nucléaire et celle de surgénérer le combustible nucléaire en choisissant une filière adaptée sont deux spécificités cruciales de l'énergie nucléaire à prendre en compte lorsque l'on s'intéresse au potentiel à long terme des systèmes énergétiques d'un point de vue stratégique ainsi qu'aux objectifs du développement durable.

Tout en reconnaissant les avantages potentiels du recyclage, les décideurs sont sensibles aux problèmes que soulève le retraitement et notamment la séparation du plutonium. C'est pourquoi, plusieurs options techniques et stratégiques ont été analysées récemment dans divers pays mais aussi dans des enceintes internationales. Il s'agit notamment des technologies avancées de retraitement qui permettent d'éviter de séparer le plutonium ainsi que du recours à des installations ou accords internationaux pour garantir la sécurité d'approvisionnement du combustible nucléaire et simultanément de limiter le nombre d'usines de retraitement dans le monde.

1.5 Autres études pertinentes

L'AEN a publié plusieurs études consacrées à la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables auxquelles il est fait référence dans le corps de ce présent rapport. L'AEN a étudié de façon approfondie la gestion du plutonium et, dans une moindre mesure, la gestion de l'uranium de retraitement et de l'uranium appauvri. Deux publications sur les tendances du cycle du combustible (AEN, 2002) et sur les cycles du combustible avancés et la gestion des déchets (AEN, 2006) ont permis d'explorer les cycles du combustible avancés, notamment les cycles fermés avec recyclage des matières fissiles, à savoir principalement du plutonium et des actinides mineurs, dans une perspective de développement durable. Ces études contiennent une mine d'informations sur les flux de matières dans un large éventail de cycles du combustible. De plus, elles présentent des indicateurs utilisables pour évaluer différents cycles possibles par une analyse multicritères tenant compte des trois dimensions du développement durable.

L’AIEA a lancé un important programme de travail qui couvre de nombreux aspects de la gestion des matières fissiles recyclables. La bibliographie donnée à la fin de ce chapitre ne contient que les documents les plus récents qu’elle a publiés sur ce sujet. Le lecteur pourra trouver sur son site Web un supplément d’informations sur les activités de cette agence dans ce domaine.

En France, à l’issue de la présentation et de l’examen des conclusions de la loi de 1991 sur la gestion des déchets nucléaires à vie longue, une nouvelle loi a été adoptée au mois de juin 2006 qui donne les orientations et étapes futures. Cette loi préconise de poursuivre les études sur la séparation et la transmutation en coordination étroite avec la mise au point des systèmes nucléaires de quatrième génération. Un réacteur rapide prototype doit être construit avant 2020. Les études et recherches à court terme seront axées sur la préparation d’une étude de faisabilité à paraître d’ici 2012.

Le Japon a entrepris un programme très dynamique dans le domaine du recyclage. La *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) a communiqué au mois de mars les résultats d’une étude de faisabilité sur le cycle d’un réacteur rapide commercial. Le ministère de l’Éducation, de la Culture, du Sport, de la Science et de la Technologie (MEXT) a procédé à une évaluation de ce rapport et proposé des orientations concernant l’évolution du cycle des réacteurs rapides au Japon. La *Japan Atomic Energy Commission* (AEC) analyse la proposition du ministère et doit prendre une décision concernant ses recommandations. Des bureaux d’étude, y compris JAEA, mettront au point les technologies nécessaires au nouveau cycle du combustible des réacteurs rapides et proposeront un concept de cycle du combustible de réacteur rapide d’ici 2015.

1.6 Plan du rapport

Le présent rapport se compose de cinq chapitres et de cinq annexes. Le chapitre 1, une introduction au rapport, explique les raisons pour lesquelles il a été entrepris, sa portée ainsi que la méthode adoptée par le groupe chargé de le réaliser. Il donne un aperçu du cycle du combustible nucléaire comparé à celui des autres moyens de production d’électricité. Enfin, il résume quelques études consacrées à la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables qui ont été publiées récemment.

Le chapitre 2 fait le tour des sources de matières recyclables et en établit un inventaire fondé sur les données fournies par les membres du groupe complétées par le dépouillement de la littérature sur le sujet et par des estimations du Secrétariat. Il analyse les problèmes soulevés par la gestion de chaque catégorie de matières recyclables en radioprotection, en physique des réacteurs mais aussi concernant les caractéristiques du cycle du combustible et la gestion des déchets.

Le chapitre 3 est consacré à l’analyse des deux principales solutions de gestion, sachant que l’entreposage de longue durée est considéré comme une solution provisoire seulement. Il apporte quelques éclaircissements sur les stratégies qui pourraient être adoptées pour valoriser le contenu énergétique des matières recyclables et atténuer l’impact sur l’environnement, y compris la production de déchets, des systèmes nucléaires.

Le chapitre 4 résume les divers aspects des options de gestion en fonction des principaux indicateurs relatifs aux trois dimensions du développement durable – environnementale, sociale et économique.

Le chapitre 5 tire les enseignements de l’étude et propose quelques conclusions et recommandations susceptibles d’intéresser les décideurs et les industriels lorsqu’ils évalueront les diverses solutions de gestion des matières fissiles et fertiles recyclables.

L'annexe A contient la liste des membres du groupe d'experts *ad hoc* qui ont participé aux réunions et/ou contribué à l'étude en communiquant des données ou par l'aide qu'ils ont apportée au Secrétariat pour la rédaction du rapport.

L'annexe B est une compilation de statistiques recueillies pour les besoins de l'étude concernant les stocks de matières fissiles dont disposent les pays de l'OCDE et quelques pays non membres de l'OCDE. Elle a été établie d'après les données fournies par les membres du groupe, des études de la littérature spécialisée et des estimations du Secrétariat.

L'annexe C présente à titre d'illustration des projections de la production d'électricité nucléaire et de la demande d'uranium et analyse l'offre et la demande compte tenu des diverses options possibles pour la gestion des matières recyclables.

L'annexe D décrit l'expérience et le point de vue d'un producteur d'électricité concernant le recyclage du plutonium et de l'uranium de retraitement dans un réacteur à eau sous pression.

L'annexe E récapitule de manière systématique, à partir du dépouillement approfondi de la littérature sur le sujet, les problèmes environnementaux que présentent les systèmes nucléaires, y compris les problèmes des flux de déchets et des effluents. Elle contient une liste de références et peut servir de base pour des comparaisons globales entre différentes solutions de gestion des matières fissiles et fertiles recyclables.

Références

European Commission DGXII (1999), *ExternE: Externalities of Energy*, Vol. 8 to 10, EC, Brussels, Belgium.

European Commission DGXII (1995), *ExternE: Externalities of Energy*, Vol. 1 to 6, EC, Brussels, Belgium.

Agence internationale de l'énergie (2006), *World Energy Outlook 2006*, OCDE/AIE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire
(2006a), *Données sur l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris, France.

(2006b), *Cycles du combustible nucléaire avancés et gestion des déchets radioactifs*, OCDE, Paris, France.

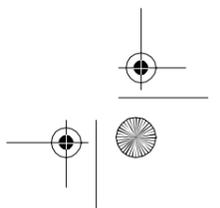
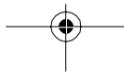
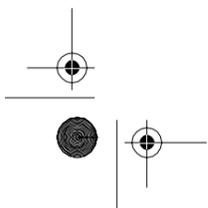
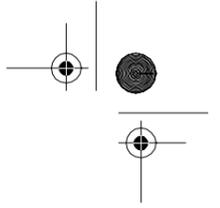
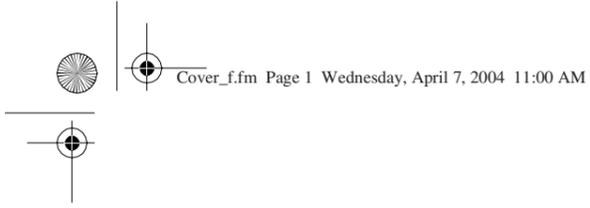
(2002), *Le cycle du combustible nucléaire – Aspects économiques, environnementaux et sociaux*, OCDE, Paris, France.

AEN et AIEA (2006), *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, France.

Sélection de références de l'AIEA

1. Proceedings of IAEA International Symposium on "Uranium production and raw materials for the nuclear fuel cycle – supply and demand, economics, the environment and energy security" – AIEA, Vienne, 20-24 juin 2005, STI/PUB/1259, 2006.
2. *Thorium fuel cycle – potential benefits and challenges*, IAEA-TECDOC-1450, mai 2005.

3. *Management of high enriched uranium for peaceful purposes: Status and trends*, IAEA-TECDOC-1452, juin 2005.
4. *Status and trends in spent fuel reprocessing*, IAEA-TECDOC-1467, septembre 2005.
5. *Viability of inert matrix fuel in reducing plutonium amounts in reactors*, IAEA-TECDOC-1516, août 2006.
6. *Management of Reprocessed Uranium: current status and future prospects*, IAEA-TECDOC-1529, novembre 2006.
7. Proceedings of IAEA International Conference on “Management of spent fuel from nuclear power reactors”, 19-22 juin 2006 (à paraître).
8. Proceedings of IAEA Technical Meeting on “Fissile material management strategies for sustainable nuclear energy”, 12-15 septembre 2005 (à paraître).
9. *Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel: Expert Group Report to the Director General of the IAEA*, AIEA, Vienne (2005), <http://www.iaea.org/Publications/index.html>.
10. 50th IAEA General Conference Special Event, *New Framework of the Utilization of Nuclear Energy in the 21st Century: Assurances of Supply and Non-Proliferation*, 19-21 September 2006, IAEA, Vienna.
www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=147



Chapitre 2

STOCKS, GESTION ET TENDANCES

2.1 Source de matières recyclables

2.1.1 Matières provenant des centrales nucléaires commerciales

La première centrale nucléaire civile construite en Europe consommait de l'uranium naturel. Il n'était pas nécessaire d'enrichir la teneur en ^{235}U du combustible, de sorte qu'il n'y avait pas de rejet d'usine d'enrichissement. Cependant l'irradiation du combustible était limitée. Après son déchargement, ce dernier était retraité sans délai de façon à séparer et à récupérer les matières fissiles non utilisées sous la forme d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium. Ces matières étaient alors fortement purifiées et ne contenaient pour ainsi dire pas de produits de fission. En raison du faible niveau d'irradiation du combustible, l'uranium et le plutonium étaient d'excellente qualité fissile.

Aux États-Unis, les centrales nucléaires civiles utilisant de l'uranium enrichi ont été mises au point assez tôt si bien que la partie amont du cycle du combustible produisait déjà à cette époque des rejets d'usines d'enrichissement de l'uranium. L'option du retraitement a été abandonnée à la fin des années 70. Les matières fissiles qui auraient pu être récupérées sont donc restées dans le combustible irradié.

Les premières filières de centrales nucléaires russes (ex-Union soviétique) brûlaient à la fois de l'uranium naturel et de l'uranium enrichi d'où la présence de rejets d'usines d'enrichissement et d'uranium et de plutonium récupérés au cours du retraitement.

D'autres pays, notamment le Canada, ont mis au point une filière de centrale nucléaire qui, bien qu'utilisant de l'uranium naturel, pouvait atteindre des taux d'irradiation plus élevés avant le déchargement du combustible du réacteur. Comme le combustible n'était pas retraité, aucune matière fissile n'était récupérée dans la partie amont ou la partie aval du cycle du combustible.

Avec l'essor du nucléaire dans le monde, on s'est efforcé de construire des centrales utilisant du combustible à uranium enrichi capable de supporter des taux d'irradiation élevés. D'où la production d'une quantité relativement plus importante de rejets d'usines d'enrichissement dans la partie amont du cycle. De plus, comme la majorité du combustible déchargé n'était pas retraité, le contenu fissile non utilisé est resté dans le combustible irradié.

On résumera de la manière suivante les sources de matières fissiles présentes dans le cycle du combustible nucléaire civil et qui pourraient être éventuellement recyclées :

- rejets des usines d'enrichissement de l'uranium ayant une teneur en ^{235}U inférieure à 0,7 %, c'est-à-dire de l'ordre de 0,2 à 0,4 % ;
- uranium récupéré lors du retraitement du combustible irradié, que l'on appelle couramment URT et dont la teneur en ^{235}U se situe normalement entre 0,4 et 0,8 % ;

- plutonium récupéré du combustible irradié retraité ;
- contenu fissile non utilisé du combustible irradié qui a été entreposé mais peut être récupéré par retraitement.

Le thorium, bien que non fissile, peut être irradié dans un flux de neutrons pour donner de l' ^{233}U qui, lui, est fissile. Cette transmutation est analogue à ce qui se produit lorsque ^{238}U , irradié, se transforme en ^{239}Pu . Dans un souci d'exhaustivité, les stocks de thorium sont inclus dans ce rapport parmi les matières fertiles qui pourraient être utilisées comme combustibles nucléaires à l'avenir.

Le thorium est présent à l'état naturel dans la croûte terrestre. Le thorium naturel est constitué de près de 100 % d'atomes de ^{232}Th . On a trouvé des sables contenant de la monazite dont la teneur en thorium est de 5 à 10 % sur les côtes de l'Australie, du Brésil, de l'Égypte et de l'Inde ainsi que d'autres gisements de thorium aux États-Unis. Les sables contenant de la monazite sont traités pour en extraire les terres rares, le titane et le zircon. En général, le thorium reste dans les résidus du procédé (AEN, 2002a). À l'échelle du monde, on a peu prospecté à ce jour pour trouver des gisements de minerai de thorium, mais les analyses géologiques laissent penser que c'est un élément aussi abondant que l'étain, en tout cas trois fois plus abondant que l'uranium.

2.1.2 Substances issues du démantèlement des armements

La mise au point d'armes nucléaires a précédé l'exploitation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Les premières armes étaient fabriquées avec de l'uranium hautement enrichi (UHE), c'est-à-dire dont la teneur en ^{235}U était supérieure à 93 %. Sont apparus ensuite des armements utilisant du plutonium, presque exclusivement du ^{239}Pu . Pour obtenir ces matières, il fallait donc soit :

- enrichir de grandes quantités d'uranium naturel et, par là même produire également de grandes quantités de rejets d'enrichissement ; ou
- retraiter de l'uranium faiblement irradié pour séparer et récupérer le plutonium qu'il contient et, par le même procédé, l'uranium non consommé.

Ces procédés produisent de grandes quantités d'uranium sous forme de rejets et d'URT que l'on peut éventuellement recycler.

Plus récemment, les États-Unis et la Russie ont déclaré posséder, sous forme d'uranium hautement enrichi et de plutonium, d'importantes quantités de matières de qualité militaire qui dépassent les besoins de la défense nationale et qui pourraient le cas échéant être recyclées à des fins pacifiques dans des centrales nucléaires commerciales.

2.2 Stocks et contenu énergétique des matières recyclables

À la fin de 2005, il y avait dans le monde environ 440 réacteurs de puissance commerciaux en service. Ils produisent chaque année plus de 2 500 TWh et consomment l'équivalent de 70 000 tonnes d'uranium naturel.

L'annexe B présente un état détaillé des stocks de matières recyclables accumulés à la fin de l'année 2005 qui a été établi d'après les informations communiquées par chaque pays et des d'autres données dignes de foi. Le tableau 2.1 résume les données ainsi recueillies concernant les matériaux séparés. Les chiffres ont été arrondis. Les stocks de combustible usé sont évoqués séparément ci-après

car, si l'on envisage de les réutiliser, il faut prévoir une étape supplémentaire de retraitement avant leur recyclage.

Les stocks mondiaux de matières fissiles séparées portés sur le tableau 2.1 représentent la quantité nécessaire au fonctionnement de près de 4 000 réacteurs-an avec les filières actuelles. En d'autres termes, si l'on décidait de recycler la totalité des stocks de matières séparées dans les centrales nucléaires commerciales en service aujourd'hui, on disposerait de l'équivalent d'une dizaine d'années d'approvisionnement, au rythme actuel de consommation. Sachant que les sources identifiées d'uranium naturel sont estimées égales à la consommation de 85 ans (AEN et AIEA, 2006), ce stock n'est en rien négligeable, même s'il ne représente pas une augmentation spectaculaire de l'offre de combustible nucléaire.

Tableau 2.1 Stocks de matières fissiles recyclables séparées existant à la fin de l'année 2005

Origine	Quantité (tML)	Equivalent en U naturel (10 ³ tU)	Offre potentielle, années-réacteurs*
UHE issu du démantèlement des armes	230**	70	420
Pu issu du démantèlement des armes	70	15	90
Pu	320	60	380
URT	45 000	50	300
Rejets des usines d'enrichissement	1 600 000	450	2 650

* Pour un REO de 1 000 MWe fonctionnant avec un facteur de charge de 80 %.

** Stocks résiduels une fois déduites les quantités déjà diluées et réutilisées (voir section 2.4.2).

De tous les matériaux figurant sur ce tableau 2.1, ce sont les rejets des usines d'enrichissement¹ qui, de loin, présentent le plus fort potentiel. Toutefois, la majeure partie de ces rejets est soit détenue par les entreprises d'enrichissement, soit, dans le cas des rejets produits lors de la fabrication d'armements, en possession des États. Les compagnies d'électricité n'ont pratiquement pas d'accès à ces matériaux en vue de leur recyclage. En outre, la capacité et la technologie des usines d'enrichissement actuellement en service ne sont pas adaptées à un réenrichissement massif de ces rejets.

Ne figurent pas sur le tableau 2.1 les très grandes quantités de matières potentiellement recyclables que contient le combustible utilisé actuellement entreposé. À ce jour, ce sont environ 280 000 tonnes de combustible utilisé qui ont été déchargées des centrales nucléaires commerciales dans le monde. Sur ce montant, près de 80 000 tonnes ont été retraitées, si bien qu'il reste dans les entrepôts aux alentours de 200 000 tonnes de combustible utilisé majoritairement constituées de combustible de REO. Par ailleurs, les quantités de combustible utilisé augmentent au rythme de 10 000 tonnes environ par an, venant grossir encore les stocks actuels.

1. Le lecteur trouvera des informations supplémentaires sur les stocks d'uranium appauvri dans une publication antérieure de l'AEN (AEN, 2001).

Les 200 000 tonnes de combustible usé entreposées contiennent des matières fissiles que l'on pourrait éventuellement réutiliser et notamment du plutonium, de l'uranium et des actinides mineurs. Près de 1 700 tonnes de plutonium et environ 190 000 tonnes d'équivalent en uranium naturel pourraient être recyclées avec les technologies actuelles des réacteurs et du cycle du combustible. Si les stocks de combustible usé étaient retraités, les matières fissiles ainsi récupérées permettraient d'alimenter pendant sept ans et demi toutes les centrales nucléaires en service dans le monde au début de l'année 2006.

Toutefois, les usines de retraitement commerciales aujourd'hui en service ou prévues représentent une capacité de production qui ne dépasse pas 4 000 tonnes de combustible usé de REO par an. Leur capacité réelle est même inférieure. Il est clair, par conséquent, qu'il faudrait augmenter considérablement la capacité de retraitement pour retraiter une proportion importante du stock actuel au lieu de le placer directement dans des dépôts comme prévu dans les plans actuels.

Ce n'est pas parce que les matières fissiles recyclables récupérées lors du retraitement peuvent être recyclées dans les filières actuelles de REO que cette solution est optimale pour ces matières. Dans la perspective d'une stratégie énergétique durable à l'échelle mondiale, le plutonium contenu dans les stocks de combustible usé, par exemple, pourrait servir à démarrer un programme de surgénérateurs rapides.

Un réacteur rapide de 1 400 MWe consommerait entre 10 et 12 tonnes de Pu environ pour la première charge plus les deux premiers rechargements. Après le deuxième rechargement, ou après deux ans environ de fonctionnement à pleine puissance, le réacteur rapide devrait pouvoir fonctionner de manière autonome avec le plutonium récupéré lors du retraitement du combustible déchargé.

Par conséquent, les 1 700 tonnes de Pu contenu dans les stocks actuels de combustible des REO permettraient de démarrer sans délai près de 150 réacteurs rapides d'une puissance installée unitaire de 1 400 MWe. Toutefois, le rythme auquel on pourrait introduire des réacteurs rapides pour remplacer les REO en fin de vie dépendrait de la capacité des usines de retraitement d'extraire le plutonium des stocks de combustible usé des REO (AEN, 1997).

Le déploiement des filières de réacteurs et cycles du combustible avancés associé à un recyclage rapide augmenterait de manière spectaculaire la durée des ressources naturelles de combustible nucléaire. En effet, si l'on choisissait de construire à grande échelle des réacteurs surgénérateurs rapides avec les usines nécessaires pour recycler le combustible, on pourrait multiplier par cinquante au moins la valeur des ressources actuelles d'uranium naturel et ainsi prolonger la durée de vie des ressources identifiées aujourd'hui jusqu'à 4 000 ans au moins.

Un simple recyclage des stocks actuels de matières fissiles séparées dans les REO de la génération actuelle n'interdit pas d'opter ultérieurement pour un nouveau recyclage dans des réacteurs rapides. Ce simple recyclage dans des REO peut être considéré comme une phase intermédiaire avant un recyclage dans des réacteurs rapides et permettrait de diminuer la capacité totale de retraitement nécessaire.

En outre, ce recyclage peut offrir à une entreprise d'électricité une source de combustible garantie sur une période couvrant une bonne partie de la durée de vie de la centrale. À titre d'exemple, à la centrale nucléaire de KKG à Gosgen, en Suisse, le recyclage des matières issues du retraitement a assuré un approvisionnement en combustible qui permettra de répondre à la demande sur toute la durée de vie résiduelle de la centrale (voir annexe D).

2.3 Recyclage et gestion des déchets

Outre qu'il permet de récupérer l'énergie contenue dans les matières recyclables, le bombardement neutronique présente l'avantage de réduire le potentiel radiotoxique des déchets présents dans le combustible usé (voir figure 3.3). En effet, la quantité de déchets radioactifs a beau être extrêmement faible comparée aux déchets produits par d'autres procédés industriels, le public s'inquiète des risques que pourraient présenter ces déchets qui resteront radioactifs des milliers et des milliers d'années.

Dans le passé, le choix du retraitement et du recyclage des matières fissiles ou, au contraire, le refus de cette solution reposaient sur des considérations stratégiques. Ces dernières continueront de peser sur la mise au point et le déploiement de cycles du combustible avancés comme le multi-recyclage associé à la séparation et à la transmutation des actinides mineurs. Outre la valorisation des ressources en uranium, un facteur prend une importance croissante : la réduction des volumes et de la toxicité des déchets radioactifs produits lors du retraitement et du recyclage et les avantages correspondants dans une perspective de développement durable.

Aujourd'hui, en l'absence de surgénérateur rapide, le recyclage du plutonium extrait du combustible de REO usé ne peut s'effectuer qu'en utilisant, dans les REO, du combustible à mélange d'oxydes (MOX). Le recyclage du plutonium dans le REO-MOX permet d'abaisser la radiotoxicité du combustible usé résiduel si l'on stocke le combustible MOX usé après un premier passage en réacteur, c'est-à-dire s'il n'est pas recyclé. Des retraitements et recyclages multiples peuvent abaisser la radiotoxicité des déchets de trois à dix fois. Théoriquement, en séparant plusieurs fois le plutonium et l'uranium des produits de fission et des actinides mineurs, on pourrait faire décroître à long terme la radiotoxicité des déchets à stocker d'un facteur 10. Toutefois, cette réduction ne s'obtient qu'après de nombreuses décennies et seulement si les pertes de procédé sont très faibles.

Les pratiques actuelles de retraitement permettent d'ores et déjà de diminuer de manière significative les volumes de déchets radioactifs. Une tonne de combustible usé représente près de 1,5 m³ de déchets de haute activité (DHA). Après retraitement, elle est réduite à moins d'un demi mètre cube, dont 0,115 m³ de déchets vitrifiés de haute activité et 0,35 m³ de déchets de moyenne activité (DMA). Un compactage supplémentaire peut être réalisé avant le stockage (AEN, 2002a). Toutefois, quelle que soit l'option choisie pour le cycle du combustible, on aura toujours besoin d'un dépôt de stockage définitif pour les déchets radioactifs.

2.4 Solutions et enjeux

2.4.1 Rejets des usines d'enrichissement

Les rejets des opérations d'enrichissement antérieures peuvent être facilement récupérés dans des installations d'entreposage et présentent de loin le plus fort potentiel de recyclage de matières fissiles. Partant d'une quantité estimée de 1,5 million tU de rejets entreposés et à supposer que la teneur isotopique moyenne soit de 0,3 % d'²³⁵U, ces substances pourraient être enrichies pour obtenir près de 420 000 tonnes d'équivalent uranium naturel moyennant près de 460 millions d'unités de travail de séparation (UTS). Un deuxième enrichissement des rejets résultants à 0,14 % environ d'²³⁵U permettrait d'obtenir 130 000 tonnes supplémentaires d'équivalent uranium naturel. Ce deuxième enrichissement exigerait 590 millions d'UTS supplémentaires.

À l'heure actuelle, la capacité des usines d'enrichissement de l'uranium en service représente 49 millions d'UTS par an dans le monde entier. Cinquante cinq pour cent environ de ces usines

utilisent la technologie de centrifugation, le reste la technologie de diffusion gazeuse (AEN, 2002a ; AIEA, 2006). Presque toutes les usines d'enrichissement fonctionnent depuis déjà longtemps et leur coût est déjà largement amorti. Deux usines exploitant la technologie de centrifugation d'une capacité totale d'environ 10 millions d'UTS sont en construction.

Pour une quantité donnée de travail de séparation, la consommation d'énergie électrique d'une usine d'enrichissement par centrifugation ne dépasse pas 5 à 10 % de celle nécessaire dans une usine d'enrichissement par diffusion gazeuse. C'est pourquoi les usines utilisant la centrifugation affichent les coûts d'exploitation les plus bas et devraient être privilégiées pour des raisons économiques si l'on envisage de recycler les rejets. Techniquement, cette technique possède également des qualités supérieures car la quantité d'hexafluorure d'uranium à manipuler au cours de chaque campagne est moindre.

La capacité d'enrichissement nécessaire aujourd'hui pour satisfaire les besoins en combustible des centrales nucléaires en service dans le monde entier représente 37 millions d'UTS/an. Il pourrait s'agir en fait d'une borne inférieure en raison des effets actuels de la dilution de l'uranium hautement enrichi. Toutefois, si l'on adopte cette valeur, il existe aujourd'hui une capacité d'enrichissement excédentaire de près de 12 millions d'UTS/an. À supposer qu'on puisse l'exploiter pour un premier enrichissement des stocks actuels de rejets, on évalue à 11 000 tonnes environ la quantité d'équivalent uranium naturel qui pourrait être produite chaque année, ce qui représente à peu près 15 % de la demande mondiale actuelle. À ce rythme, il faudrait près de 40 ans pour enrichir une seule fois les stocks actuels de rejets. Avec deux usines d'une capacité totale de 10 millions d'UTS/an en chantier aujourd'hui, il serait possible d'accélérer le rythme de production évoqué ci-dessus et de réduire donc la durée de l'opération, à condition toutefois qu'aucune des usines actuellement exploitées ne ferme.

D'ici là, aux rythmes actuels de production, on produira chaque année près de 60 000 tonnes de rejets dont il faudra tenir compte dans l'évaluation de la valeur énergétique potentielle des stocks mondiaux. Ces rejets proviennent des activités civiles et, suivant les termes des contrats, peuvent appartenir soit à la compagnie d'électricité, soit à l'entreprise assurant l'enrichissement. À ce jour, les compagnies d'électricité ont plutôt opté pour un transfert de propriété des rejets à l'enrichisseur. Aux rythmes actuels de production, on aura besoin de 25 ans seulement pour créer un stock équivalant au stock actuel.

Pour donner quelques repères économiques, le seuil de rentabilité du recyclage des rejets est atteint lorsque le prix d'une UTS est égal au prix d'un kg de minerai d'uranium (U_3O_8) plus le prix de sa conversion en UF_6 . On suppose dans ce cas que le coût de l'entreposage des rejets est négligeable. D'après des études antérieures de l'AEN consacrées aux prix de l'uranium et des différentes composantes du cycle du combustible (AEN, 2002a et 1994), le prix de l'uranium doit atteindre sa valeur maximale et le prix de l'enrichissement sa valeur minimale pour que le recyclage des rejets soit justifié, pour des raisons économiques uniquement.

Il convient de noter que la majorité des stocks actuels de rejets a été produite lors d'opérations d'enrichissement à des fins militaires et qu'il reste en possession des États. Pour le reste des stocks, d'origine civile, il est souvent prévu dans les contrats un transfert de la propriété des rejets à l'enrichisseur. Dans ces circonstances, on pourrait décider de se servir de la capacité d'enrichissement excédentaire pour réenrichir les rejets pour des raisons qui ne relèvent pas *stricto sensu* du raisonnement économique puisque seul le coût marginal intervient à ce stade.

Pour être enrichi, l'oxyde d'uranium purifié doit être transformé en un gaz, l'hexafluorure d'uranium. Si le coût de ce procédé de conversion reste raisonnable, à savoir 10 à 15 % du prix d'achat

de l'uranium, il représente néanmoins un facteur important à prendre en compte dans l'évaluation du recyclage des rejets des usines d'enrichissement.

D'un point de vue économique, il est bon que près de 90 % des rejets actuels soient encore aujourd'hui entreposés sous forme d'hexafluorure d'uranium dans des conteneurs en acier. Ces conteneurs sont à l'origine remplis d'UF₆ chaud à l'état liquide. Ensuite, on les laisse refroidir quelques jours au cours desquels la quasi-totalité de l'UF₆ passe à l'état solide, passage à l'issue duquel il ne représente plus que 60 % du volume du cylindre. Le reste de l'espace est rempli d'UF₆ à l'état gazeux à une pression inférieure à la pression atmosphérique. L'UF₆ s'allie au fer des surfaces internes pour former une couche de protection de fluorure de fer qui inhibe la corrosion interne. Par contre, la corrosion externe peut ouvrir des voies de fuite dans la paroi du conteneur, un incident très rare d'après l'expérience acquise à ce jour. Toutefois, comme le gaz se trouve dans le conteneur en dépression, une ouverture dans la paroi permet à de l'air humide d'entrer dans le conteneur jusqu'à ce que la pression des deux côtés de la paroi soit égale. Cet air humide réagit avec l'UF₆ du conteneur et avec le fer ainsi exposé pour former un bouchon dense constitué de composés d'uranium et de fer solides et produit, à un rythme très lent, du fluorure d'hydrogène à l'état gazeux susceptible de s'échapper.

La sûreté des entreposages de grandes quantités d'UF₆ rejeté doit donc faire l'objet d'un contrôle pour vérifier l'intégrité des conteneurs. Dans certains pays, en France en particulier, il est courant de reconvertir les rejets d'UF₆ en oxyde d'uranium solide et stable (U₃O₈). Aux États-Unis, le ministère de l'Énergie construit actuellement deux usines de conversion d'UF₆ en U₃O₈ où il a l'intention de faire passer sous forme solide les rejets d'UF₆ que contiennent actuellement près de 58 000 conteneurs cylindriques. Cette opération de conversion devrait commencer d'ici 2020.

Cette transformation des rejets sous une forme solide limite les risques chimiques potentiels mais, en contrepartie, altère les performances économiques du réenrichissement. Plus on tarde à décider de réenrichir les rejets, plus grande est la probabilité d'avoir, pour des raisons de sûreté, à convertir l'UF₆ en une forme solide plus stable et donc moindre sera l'avantage économique.

Bien que les stocks de rejets représentent une réserve importante d'uranium, le recyclage n'a jusqu'à présent été entrepris qu'à une échelle limitée. L'intérêt commercial de l'opération tient à l'existence d'une capacité excédentaire dans des usines d'enrichissement par centrifugation, associée à de faibles coûts d'exploitation. Au cours des sept dernières années, la quasi-totalité des opérations de réenrichissement des rejets ont eu lieu dans des usines de la Fédération de Russie. L'équivalent en uranium naturel ainsi produit a été livré à des pays de l'Union européenne à un rythme maximum de 1 200 tU/an, ce qui correspond à 7 % environ des besoins annuels de l'Union européenne en combustible nucléaire (AEN et AIEA, 2006). Plus récemment, les livraisons ont été divisées par deux environ. De plus, les rejets ont été réenrichis dans la Fédération de Russie pour obtenir de l'uranium à environ 1,5 % d'²³⁵U utilisable pour diluer en uranium faiblement enrichi l'uranium fortement enrichi des armes nucléaires.

Aux États-Unis, le ministère de l'Énergie et la *Bonneville Power Administration* ont lancé un projet pilote dont la finalité est de réenrichir 8 500 tonnes de rejets faisant partie des stocks du ministère (à une teneur isotopique supérieure à 0,4 % d'²³⁵U). Ce projet pilote devrait produire en deux ans 1 900 tonnes d'équivalent en uranium naturel destinés à alimenter la *Columbia Generating Station* (centrale de Columbia) de 2009 à 2017.

2.4.2 Uranium hautement enrichi démilitarisé

Le recyclage de l'uranium hautement enrichi démilitarisé sera l'occasion de démontrer concrètement la possibilité de « fondre des épées pour en faire des charrues² ». Les accords signés en 1993 entre les États-Unis et la Fédération de Russie ouvrent la voie à ce recyclage, mais sa mise en œuvre soulève un certain nombre de problèmes techniques, économiques, de sûreté et de sécurité.

À ce jour, la moitié environ des 500 tonnes de UHE russe qui devaient être recyclées à des fins pacifiques ont été diluées en Fédération de Russie et transportées aux États-Unis où l'USEC les vend à des exploitants de centrales nucléaires commerciales. Plus de 90 centrales américaines de 31 États ont déjà reçu du combustible fabriqué avec cet uranium. Les stocks résiduels d'UHE russe destinés à un usage civil s'élèvent à 250 tonnes (voir annexe B).

À la fin de 2005, près de la moitié des 150 tonnes d'UHE que les États-Unis ont déclaré en excès par rapport aux besoins de leur sécurité nationale et destinés à des applications civiles dans des centrales nucléaires avaient été converties avant leur dilution. Au début de 2005, une partie des matières diluées a servi à fabriquer du combustible de REO et a été livré à la centrale nucléaire de Browns Ferry que possède TVA. *Nuclear Fuel Services* s'est chargé de diluer l'UHE à Erwin, au Tennessee. En outre, plus de 100 tU à 4,95 % d'²³⁵U ont été produites par dilution sur le site du ministère de l'Énergie à Savannah River (Nuclear Fuel, 31 janvier 2005). Le reste de l'UHE destiné aux centrales nucléaires représentait 70 tonnes à la fin de 2005 (voir annexe B).

Bien que le ministère de l'Énergie des États-Unis ait annoncé en novembre 2005 qu'il convertirait définitivement à usage civil 200 tonnes supplémentaires d'UHE d'origine militaire, la majorité de ces substances servira à la propulsion marine et aux réacteurs spatiaux ou de recherche. Moins de 20 tonnes seront diluées en UFE en vue de leur utilisation dans des réacteurs de puissance commerciaux. L'UFE destiné aux centrales nucléaires commerciales sera progressivement mis sur le marché au cours des 25 prochaines années (AEN et AIEA, 2006).

La dilution des stocks d'UHE militaire à des teneurs en ²³⁵U adaptées à leur utilisation dans des REO représente, par son importance, la deuxième option de recyclage. L'UHE de qualité militaire se trouve sous une forme métallique qui nécessite sa transformation en oxyde d'uranium avant de le diluer pour obtenir des niveaux d'enrichissement plus faibles (inférieurs à 5 % d'²³⁵U) adaptés à la filière et, de plus ; exigés pour pouvoir procéder aux opérations de traitement chimique et de dilution. De plus, il n'est pas possible de manipuler l'UHE militaire, dont le taux d'enrichissement peut être égal ou supérieur à 93 % d'²³⁵U, dans les usines actuelles du cycle du combustible et l'on a besoin d'installations spécialement conçues et autorisées en fonction du risque de sûreté-criticité et des exigences de la protection physique et des garanties.

Il est probable que le traitement chimique et la dilution de l'UHE se cantonneront aux usines de la Fédération de Russie et des États-Unis en raison du caractère sensible du type et de la source de ces matériaux. Toutefois, une fois le taux d'enrichissement de l'UHE abaissé, il n'y a aucune raison de ne pas le vendre à l'étranger même si certains pays peuvent avoir des réticences politiques ou sociales à acheter du combustible nucléaire civil d'origine militaire. Et de fait, l'UFE tiré d'UHE russe a déjà été transporté aux États-Unis et, en quantité moindre, à des pays de l'Union européenne.

Le reste de l'UHE démilitarisé destiné à alimenter les centrales nucléaires commerciales est estimé à 230 tonnes (voir annexe B et tableau 2.1). Il pourrait faire fonctionner le parc de réacteurs mondial une année entière. Il est prévu de l'exploiter cependant sur une plus longue période car les

2. *Transform swords into ploughshares.*

États-Unis sont soucieux d'éviter de perturber les marchés de l'uranium et de l'enrichissement en commercialisant de l'UFE tiré d'UHE militaire.

2.4.3 Plutonium démilitarisé

En plus du recyclage de l'UHE démilitarisé, des quantités excédentaires de plutonium de qualité militaire ont été dédiées à l'alimentation en combustible des centrales nucléaires civiles. Vers la fin de l'année 2000, les États-Unis et la Fédération de Russie ont conclu un accord concernant l'élimination du plutonium excédentaire. Aux termes de cet accord, chacun des deux pays se débarrassera de 34 tonnes de plutonium de qualité militaire d'ici la fin de 2020. Ce plutonium doit ensuite être mélangé à de l'uranium pour obtenir un combustible à mélange d'oxydes (MOX) qui peut être chargé dans les centrales nucléaires civiles actuelles, principalement des REO.

Ces deux pays ont entrepris de construire des usines de fabrication de MOX. Aux États-Unis, l'usine de MOX sera installée sur le site de Savannah River qui appartient au ministère de l'Énergie. Elle devrait commencer à produire en 2015 du combustible destiné à quatre centrales commerciales bénéficiant d'une autorisation spéciale. Des assemblages combustibles de démonstration ont déjà été chargés pour vérifier le comportement du combustible. Le combustible MOX que l'on pourra fabriquer à partir de 70 tonnes environ de plutonium de qualité militaire excédentaire se substituera, sur toute la durée du programme, à quelque 14 000-16 000 tonnes d'uranium naturel.

2.4.4 Uranium de retraitement

De toutes les solutions possibles pour recycler les matières fissiles, la réutilisation de l'uranium et du plutonium de retraitement est la technique la plus au point et qui bénéficie de la plus grande expérience industrielle. Bien que le recyclage des stocks actuel d'URT et de plutonium ne représente pas un potentiel énergétique, important – approximativement 70 000 tonnes d'équivalent en uranium naturel ou un an de la demande mondiale d'aujourd'hui – la démonstration de la faisabilité industrielle et commerciale du recyclage sera déterminante pour l'avenir. Au cours des dernières décennies, des usines de taille industrielle ont été exploitées sur le marché concurrentiel. Ces usines ont une implantation géographique diversifiée et les techniques à la base des procédés employés sont variées.

Au niveau mondial, le retraitement des combustibles irradiés à base d'oxydes qui proviennent principalement des REO mais aussi des réacteurs à gaz avancés au Royaume-Uni, a produit aux alentours de 45 000 tonnes d'URT sous forme d'oxyde d'uranium. Le recyclage des matières fissiles récupérées lors du retraitement du combustible des réacteurs rapides a été démontré également à échelle industrielle dans plusieurs pays. Des quantités limitées de matières ont jusqu'à présent été réenrichies dans des usines utilisant la technologie de centrifugation aux Pays-Bas et en Russie. Si la démonstration de la réalisation pratique du recyclage est faite, il faudra néanmoins construire des usines d'une capacité bien plus importante pour transformer en UF₆ l'oxyde d'uranium récupéré avant son réenrichissement.

Certains pays ont d'ores et déjà recyclé de grandes quantités d'uranium de retraitement. Au Royaume-Uni, au cours des dernières années d'exploitation de l'usine de diffusion gazeuse de Capenhurst, dans les années 80, plus de 15 000 tonnes d'uranium extrait lors du retraitement du combustible des réacteurs Magnox ont été converties et réenrichies aux taux adaptés au combustible pour réacteurs à gaz avancés. Cette source de combustible a constitué la première charge de bien des centrales à réacteurs à gaz avancés où elle a permis d'obtenir un retour d'expérience satisfaisant. En Belgique, la tranche 1 de Doel fonctionne depuis plusieurs années exclusivement avec du combustible

tiré d'URT réenrichi. L'Inde a recyclé 250 tonnes d'URT dans ses réacteurs à eau lourde sous pression. La Suède a, quant à elle, recyclé 136 tonnes d'URT dans des REO en 2000 et 2001.

L'utilisation d'URT pour diluer de l'UHE ou de l'uranium moyennement enrichi s'est révélé un emploi extrêmement efficace et rentable de cette matière. Depuis 2000, l'entreprise suisse KKG charge régulièrement ses réacteurs avec du combustible produit de cette manière (voir annexe D). En utilisant l'URT de cette manière, on évite les contraintes techniques liées à la présence d' ^{235}U .

Il est probable qu'à l'avenir le recyclage de l'URT dépendra de considérations économiques et stratégiques. Du point de vue de la gestion des ressources naturelles, en utilisant de l'URT on s'abstient d'extraire une certaine quantité de minerai d'uranium naturel, et l'on évite ainsi de produire des résidus d'extraction et de traitement, ce qui pourrait prendre de l'importance dans la perspective du développement durable. Les stocks actuels d'URT sont assez limités, mais l'exploitation de diverses usines de retraitement commerciales dans le monde pourrait permettre de produire jusqu'à 4 000 tonnes d'URT par an avec une teneur en ^{235}U située entre 0,4 et 0,8 %. Cela représente entre 5 et 10 % de la demande actuelle d'uranium dans le monde ou la production d'une mine d'uranium importante.

2.4.5 Plutonium de retraitement

On possède d'ores et déjà une expérience substantielle de la fabrication et de l'utilisation du combustible MOX dans les centrales nucléaires, en particulier en Europe. On y trouve en effet des usines de MOX d'une capacité annuelle de production avoisinant 230 tonnes de combustible pour réacteurs à eau ordinaire. Ces usines ont été installées pour permettre le recyclage du plutonium récupéré lors du retraitement.

À la fin de 2005, 39 REO au total avaient été autorisés à utiliser du combustible MOX. On estime à l'heure actuelle à près de 2 000 tonnes la quantité de combustible MOX qui a été fabriqué et chargé dans ces réacteurs. À titre indicatif, le recyclage d'une tonne de Pu produit environ 25 tonnes de combustible MOX adapté aux centrales REO existantes et permet de remplacer près de 200 tonnes d'uranium naturel. On estime que ce stock de plutonium récupéré représente approximativement 200 à 250 tonnes et que son utilisation dans le combustible MOX permettrait d'économiser de 40 000 à 50 000 tonnes d'uranium naturel.

Sachant que les REO exploités aujourd'hui n'ont pas été conçus spécifiquement pour utiliser du combustible MOX, la physique du réacteur limite à moins de 50 % de la charge totale du cœur la quantité de ce combustible qui peut y être présente à un moment donné. Les nouvelles filières de REO sont conçues pour pouvoir fonctionner avec une charge de MOX de 100 % du cœur. Des modélisations et études de sûreté approfondies ont montré qu'il n'existe pas d'obstacle majeur à l'utilisation du combustible MOX dans les filières actuelles et futures de REO (AEN, 1995, 2002b et 2003).

Outre les contraintes liées à la conception des réacteurs actuels, l'exploitation de ce combustible est limitée par la capacité totale des usines de combustible MOX en service aujourd'hui, c'est-à-dire à peu près 230 tML/an. Une nouvelle usine de combustible MOX de 130 tML/an doit entrer en service au Japon en 2012 et, à plus court terme, il est prévu d'augmenter de 50 tML/an la capacité de l'usine de MOX française. Inversement, les contraintes de production ne permettent pas d'augmenter la capacité de l'usine britannique et l'usine belge devrait fermer ses portes d'ici peu. Par conséquent, si davantage d'exploitants de centrales REO devaient choisir de retraiter et de recycler, la capacité de production de MOX deviendrait insuffisante.

En fonction du taux de combustion envisagé, les usines de MOX traitent de 50 à 70 kg de plutonium par tonne de MOX produit (AEN, 1989). Les usines de MOX en service dans le monde aujourd'hui sont capables d'incorporer au combustible à peu près 15 tonnes de Pu par an, un chiffre qui pourrait passer à 20-25 tonnes de Pu par an au cours des dix prochaines années. Les stocks actuels de plutonium civil sont situés entre 200 et 250 tonnes, de sorte que, avec les usines de MOX actuelles et prévues, il faudra au moins 15 ans pour convertir cette quantité en combustible MOX utilisable dans des REO.

Le fonctionnement à pleine capacité des usines de retraitement actuelles permettrait de produire chaque année entre 30 et 40 tonnes de plutonium en plus des stocks civils actuels. Ce plutonium doit être recyclé le plus tôt possible après sa sortie des usines de retraitement pour éviter l'accumulation d'américium. C'est pourquoi il convient de dimensionner les usines de MOX en fonction de la production des usines de retraitement et de prévoir les autorisations de chargement de MOX dans les réacteurs en conséquence.

À l'heure actuelle, la fabrication du combustible MOX destiné aux REO repose principalement sur le procédé MIMAS (Belgique et France) ou sur le « *Short Binderless Route* », ou procédé SBR (Royaume-Uni). Dans le procédé MIMAS, l'oxyde de plutonium provenant de l'usine de retraitement est d'abord réduit à l'état de poudre fine avec une petite quantité d'oxyde d'uranium dans des proportions de 70:30 avant une nouvelle dilution avec de l'oxyde d'uranium qui a lieu mécaniquement. Le mélange ainsi produit est pressé sous forme de pastilles qui sont frittées. Dans le procédé SBR, l'oxyde de plutonium est réduit à l'état de poudre fine avec tout l'oxyde d'uranium nécessaire en une seule passe avant pastillage et frittage.

Au Japon et en Fédération de Russie, les travaux de développement visent à éviter de produire de l'oxyde de plutonium séparé car cette démarche serait plus antiproliférante. Les travaux au Japon consistent à mélanger une solution de nitrate de plutonium avec du nitrate d'uranium. Le mélange 50:50 est chauffé par micro-ondes ce qui permet d'éliminer les nitrates et de produire la poudre de MOX.

En Fédération de Russie, deux technologies de production du MOX ont été mises au point. La première repose sur une co-précipitation par de l'ammoniac des flux de plutonium et d'uranium, suivie par la production de poudre MOX et le pastillage. La deuxième consiste en une conversion pyro-électrolytique du combustible usé à l'issue de laquelle un mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium se dépose sur la cathode. Ce dépôt est ensuite broyé, tamisé et vibrocompacté pour donner le combustible que l'on trouve dans les aiguilles des réacteurs rapides. Ce combustible subit actuellement des tests d'irradiation dans les réacteurs rapides BOR-60 et BN-600.

En France, deux méthodes avancées sont à l'étude : le procédé COEX où l'on sépare ensemble l'uranium et le plutonium pour fabriquer un combustible MOX dans une même installation et le procédé GANEX qui consiste à extraire ensemble tous les actinides du combustible usé et permet de recycler simultanément l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs. Il est prévu de mettre en place des laboratoires et des ateliers pour effectuer la démonstration des systèmes nucléaires de la quatrième génération utilisant ces technologies d'ici 2012.

Si l'on veut se réserver la possibilité d'opter pour le multirecyclage, il faudra prêter attention à la solubilité des pastilles de combustible MOX irradié au cours des opérations de retraitement ultérieures. Il conviendra également de tenir compte de la production de chaleur plus forte du MOX irradié notamment pour la conception des centrales, en particulier si l'on envisage de stocker ce type de combustible sans le retraiter. À l'heure actuelle, on ne prévoit qu'un seul passage du combustible en

REO suivi par l'entreposage du combustible MOX usé en attendant un retraitement et un recyclage ultérieurs dans des filières de réacteurs avancées.

L'évolution qui consiste à porter les combustibles à uranium enrichi à des taux de combustion de plus en plus élevés avant de les décharger des réacteurs a des conséquences sur la qualité du plutonium qu'ils contiennent. Plus le taux de combustion de rejet est élevé, plus la quantité d'actinides mineurs présents est importante et plus forte est la proportion relative d'isotopes du plutonium de masse atomique supérieure à 239 dans le combustible déchargé, ce qui a des répercussions sur la conception des futures usines de MOX. Il faudra y prévoir des protections plus épaisses, et la démonstration de la sûreté des usines vis-à-vis du risque de criticité devra être faite pour des teneurs en plutonium du combustible MOX qui dépassent les limites actuelles fixées à environ 12 %.

La tendance à utiliser du plutonium séparé de sources civiles et militaire dans le REO MOX répond à l'évolution industrielle actuelle des technologies des réacteurs et du cycle du combustible. Elle permet d'obtenir une énergie utile à court terme et peut être considérée comme une méthode pour préserver le potentiel énergétique considérable du plutonium en l'enfermant dans une matrice fortement radioactive (combustible MOX irradié) le temps nécessaire pour que l'on puisse l'exploiter complètement dans des réacteurs à neutrons rapides.

L'utilisation du plutonium est source de préoccupation pour la société civile et incite par conséquent les décideurs à la prudence. Les menaces que l'on attribue au plutonium séparé, fussent elles ou non réelles, imposent d'adopter des normes de sécurité et de protection très sévères pour toutes les opérations de traitement et de transport et toutes les utilisations de cette matière. D'un autre côté, le contenu énergétique du plutonium, en particulier s'il devait être exploité dans des réacteurs surgénérateurs rapides, pourrait constituer un atout de taille du point de vue du développement durable.

Si l'on devait abandonner l'idée d'exploiter ce potentiel, il resterait cependant plusieurs solutions techniques pour stocker ou détruire le plutonium. Techniquement, le plutonium peut être entreposé très longtemps. Toutefois, comme pour tous les autres matériaux, l'entreposage prolongé est une solution d'attente et il faut un jour prendre une décision définitive. De même que pour l'entreposage des résidus, la sûreté à long terme exige d'envisager de convertir le PuO_2 en une forme solide plus acceptable. Les travaux réalisés à ce jour ont démontré que le PuO_2 peut être incorporé à des matrices céramiques ou vitreuses adaptées à l'entreposage à long terme et au stockage en formation géologique.

Du point de vue du stockage des déchets, la présence d'actinides à vie longue dans les déchets de haute activité produits lors du retraitement provoque des inquiétudes et pourrait même être interdite par la réglementation de certains pays. Il existe des solutions techniques pour détruire ces actinides mais elles coûtent relativement cher et leur mise en œuvre dépendrait de la mise au point de nouveaux réacteurs et/ou systèmes hybrides (le lecteur trouvera un complément d'information dans les publications de l'AEN de 1999, 2002c, 2002d et 2006).

2.4.6 Thorium

Lorsque l'on bombarde avec des neutrons du ^{232}Th , il se transforme en ^{233}Th qui se désintègre rapidement en ^{233}Pa puis en ^{233}U qui est fissile et possède des propriétés physiques supérieures à l' ^{235}U . Ce procédé de transmutation s'apparente de très près à la production de ^{239}Pu par bombardement neutronique des atomes d' ^{238}U . Le thorium que l'on trouve à l'état naturel ne contient pas d'atome fissile. Il s'agit d'une matière fertile qui peut être employée pour obtenir de l' ^{233}U à condition de la mélanger avec des matières fissiles telles que l'uranium et le plutonium et de la placer dans un réacteur

nucléaire. Par conséquent, les cycles au thorium, pour être autonomes, devront comporter une étape de retraitement afin de récupérer l' ^{233}U et les autres matières fissiles inutilisées que contient le combustible irradié. Les techniques de retraitement qui ont été envisagées pour les combustibles à base de thorium utilisent des produits chimiques très corrosifs et doivent encore être démontrées à l'échelle industrielle.

On possède une expérience limitée des réacteurs fonctionnant avec du combustible à oxyde de thorium, cantonnée à l'origine aux tous premiers développements de la mise au point de filières de réacteurs aux États-Unis. Plus récemment, l'Inde a manifesté un intérêt croissant pour le cycle au thorium dont le pays en possède d'importantes réserves. L'expérience a montré que les combustibles à base de thorium ont une conductibilité thermique et des propriétés de rétention des gaz de fission satisfaisantes.

Il faut savoir néanmoins que le thorium qui serait récupéré lors du retraitement contiendrait un émetteur gamma puissant, le ^{228}Th , et que l' ^{233}U serait récupéré avec de l' ^{232}U dont les produits de filiation émettent aussi des rayons gamma durs. La présence de ces isotopes pose un problème de conception radiologique et nécessite de respecter des exigences de radioprotection pendant la re-fabrication et la manipulation du combustible avant son rechargement dans le cœur du réacteur. Les doses reçues aux étapes de fabrication et de retraitement du cycle du combustible au thorium sont nettement plus élevées que les doses produites dans le cas du MOX de REO. Comme le montre le tableau 2.2, à l'étape du retraitement, les doses sont nettement supérieures dans les cycles au thorium par rapport aux cycles au MOX REO, de quatre fois dans le cas des cycles U/Th/U et du cycle Th/U. Cela signifie que ces cycles exigeront des installations spécifiques conçues pour garantir une protection radiologique suffisante.

Tableau 2.2 Doses émises au cours des cycles au thorium par rapport aux cycles au MOX REO

Dose (n+ γ)	Étape de fabrication (pas d'impuretés)	Étape de retraitement du combustible utilisé
MOX (U, Pu) dans les REO	1	1
Th/Pu	2	5
U/Th/Pu	2	30 400 ($\gamma \gg n$)
Th/U	1	13 100 ($\gamma \gg n$)

Les États-Unis s'intéressent de nouveau au cycle du combustible au thorium/uranium depuis l'apparition du concept de réacteur au thorium de Radkowski (Radkowski *et al.*, 1998) et les études réalisées par l'ex-INEEL sur les REO (Herring *et al.*, 2005 ; AEN, 2002a), cycles qui sont tous deux ouverts. Si le cycle du combustible au thorium devait connaître la popularité, on verrait assurément apparaître de nouvelles filières de réacteurs qui exigeraient également de concevoir des usines du cycle du combustible sur mesure. Toutefois, le déploiement à grande échelle de centrales nucléaires reposant sur un cycle au thorium ne peut être considéré comme une option viable avant 50 ans, étant donné le peu de maturité des technologies du cycle du combustible adaptées, en particulier dans le domaine du retraitement, par rapport au cycle à l'uranium.

2.5 Impact de l'évolution du cycle du combustible sur le recyclage du plutonium et de l'uranium

Au cours des trois dernières décennies, les conceptions de réacteurs et de combustibles ont progressivement évolué dans le sens d'une optimisation de l'utilisation du combustible dans le cœur. Principaux objectifs recherchés, l'optimisation de la répartition entre le combustible et le modérateur, la réduction de l'absorption parasite et des fuites radiales et axiales de neutrons. Ces évolutions ont permis d'économiser au total plus de 25 % des besoins en uranium naturel par unité d'électricité produite et d'abaisser de manière substantielle les coûts du cycle du combustible (AEN, 2002a). Toutefois, la hausse progressive qui en résulte du niveau d'irradiation du combustible avant son déchargement du réacteur a des conséquences sur la qualité des matières fissiles contenues dans ce combustible.

2.5.1 Uranium

L'uranium naturel se compose de trois isotopes : l' ^{238}U (99,28 %), l' ^{235}U (0,71 %) et l' ^{234}U à l'état de trace (0,01 %). À la sortie de la centrale nucléaire, l'uranium contenu dans le combustible utilisé contient aussi de l' ^{232}U et de l' ^{236}U . La quantité d' ^{232}U est infime (moins d'une partie par million), mais la teneur en ^{236}U avoisine, elle, 0,5 %. Si l'on retraits le combustible utilisé, le flux d'uranium contient, en outre, des produits de décroissance dont le ^{208}Tl qui est important car il émet des rayons très pénétrants. La teneur en ^{208}Tl de l'uranium retraité atteint son maximum au bout de 10 ans, après quoi elle décroît pour atteindre des niveaux insignifiants au bout de 10 à 15 années supplémentaires. La composition typique de l'URT tiré de combustibles usés de REO est la suivante : ^{232}U 0,1-0,3 ppm ; ^{234}U 0,01-0,03 % ; ^{235}U 0,5-1,0 % ; ^{236}U 0,4-0,7 %, le reste étant bien entendu constitué d' ^{238}U .

D'un point de vue radiologique, la plupart des isotopes de l'uranium présents dans l'URT qui ont une très longue période et émettent un rayonnement alpha présentent des exigences très similaires à celles de la manipulation de l'uranium naturel. Leur toxicité chimique dépasse de loin leur radiotoxicité. Toutefois, la présence de ^{208}Tl impose des protections radiologiques spécifiques lors de la manipulation, de l'entreposage ainsi que des procédés de réenrichissement et de re-fabrication. À l'heure actuelle, seules deux usines d'enrichissement par centrifugation ont été utilisées pour le réenrichissement de l'URT, l'une en Fédération de Russie, l'autre aux Pays-Bas. Huit usines de combustible sont ou ont été autorisées à refabriquer du combustible à partir d'URT.

L'uranium 236 est un absorbant neutronique dans le cœur du réacteur, aussi faut-il tenir compte de son effet négatif sur la réactivité lorsque l'on utilise de l'URT pour fabriquer un nouveau combustible. Par rapport à un chargement en uranium naturel, il faut donc introduire dans le procédé d'enrichissement environ 1,5 % d'URT de plus, ce qui exige près de 2,5 % d'unités de travail de séparation pour obtenir la même valeur de réactivité du combustible (AEN, 1986).

La Fédération de Russie a mis au point et déployé à l'échelle industrielle des techniques pour mélanger de l'URT avec de l'UHE ou de l'UME obtenus lors du retraitement du combustible de réacteurs de propulsion, de réacteurs rapides et de réacteurs de recherche et avec du combustible de VVER. Cette technique permet d'éviter les inconvénients liés au réenrichissement de l'URT (Bairiot *et al.*, 2005).

Outre de l' ^{236}U , l'URT contient également des petites quantités d' ^{232}U et ^{234}U dont les descendants émettent un fort rayonnement gamma. Le recyclage de grandes quantités d'URT pourrait exiger de renforcer les mesures de contrôle radiologique aux étapes de conversion, de réenrichis-

sement et de re-fabrication du combustible. Ceci pourrait renchérir l'utilisation de l'URT par rapport à celle d'uranium naturel. Une étude antérieure de l'AEN sur les coûts du cycle du combustible nucléaire (AEN, 1994) examine de près la question de la valeur économique de l'URT qu'elle estime se situer aux alentours de 50 à 80 % de la valeur de l'uranium naturel si l'on tient compte précisément des effets de l' ^{232}U , ^{234}U et ^{236}U et de leurs descendants.

2.5.2 Plutonium

Tout réacteur nucléaire dont le cœur est chargé en uranium produit du plutonium. C'est le cas en particulier des centrales nucléaires exploitées dans le monde aujourd'hui qui reposent essentiellement sur des réacteurs à eau ordinaire (REO). Bien que ces réacteurs consomment du combustible à uranium faiblement enrichi et que la majorité de la chaleur produite soit le résultat de la fission de l' ^{235}U , la fission des isotopes du plutonium qui intervient à mesure que l'uranium est consommé produit également une grande quantité de chaleur. Le ^{239}Pu est l'isotope qui prédomine et se forme lors de la capture d'un neutron par l' ^{238}U . Si le combustible reste longtemps dans le réacteur, ce qui est pratique courante, l'absorption de neutrons par le ^{239}Pu produit du ^{240}Pu , et les captures consécutives produisent des isotopes comme le ^{241}Pu et le ^{242}Pu . Ces réactions donnent naissance également à de très petites quantités de ^{236}Pu et de ^{238}Pu .

La composition exacte des isotopes du plutonium présents dans le combustible que l'on décharge des REO dépend de la composition isotopique de la charge initiale en uranium, de la durée de la campagne du combustible en réacteur ainsi que du flux et de la distribution en énergie des neutrons dans le cœur. Une étude antérieure de l'OCDE consacrée au plutonium (AEN, 1989) contient des informations détaillées sur ce sujet. À titre indicatif, on retiendra que la composition isotopique du plutonium dans le combustible usé déchargé d'un REP est, en chiffres ronds, la suivante : 53 % de ^{239}Pu ; 25 % de ^{240}Pu ; 15 % de ^{241}Pu ; 5 % de ^{242}Pu et 2 % de ^{238}Pu .

Par comparaison, la composition isotopique du plutonium contenu dans le combustible déchargé des réacteurs qui fonctionnent avec de l'uranium naturel comme les réacteurs graphite-gaz Magnox ou les réacteurs à eau lourde sous pression Candu est la suivante : 65 % de ^{239}Pu ; 25 % de ^{240}Pu ; 5 % de ^{241}Pu ; 5 % de ^{242}Pu et des quantités négligeables de ^{238}Pu .

Les isotopes du plutonium sont radioactifs et se désintègrent principalement en émettant une particule alpha ainsi que des rayons X et/ou un rayonnement gamma. Ils ont des périodes très variables qui vont de 15 ans environ dans le cas du ^{241}Pu à 400 000 ans pour le ^{242}Pu . Le ^{239}Pu a une période de 24 000 ans. Contrairement aux autres isotopes du plutonium, le ^{241}Pu décroît en émettant une particule alpha pour donner de l' ^{241}Am (période de 430 ans) qui, à son tour, décroît en émettant une particule alpha plus des rayons pénétrants – rayons X et gamma.

Le plutonium est une substance très radiotoxique si elle est absorbée par le corps par inhalation, ingestion ou injection. Les mesures de radioprotection consistent à le confiner de manière sûre en utilisant des boîtes à gants de haute intégrité et des systèmes de ventilation avec filtration. Toutefois, l'émission de rayons X et de rayonnements gamma, notamment par le ^{238}Pu et l' ^{241}Am , mais également l'émission de neutrons présente un risque d'irradiation externe. À certains stades de la chaîne de traitement, des protections radiologiques sont nécessaires en plus de celles assurées par les matériaux de la boîte à gants. La chaleur de décroissance du plutonium est un facteur dont il convient de tenir compte également lorsqu'on envisage de le manipuler et de l'entreposer. Toutefois, le plutonium est loin d'être une matière dangereuse unique en son genre. Il fait partie des nombreuses matières qu'il convient de manipuler avec soin pour limiter les risques, bien connus, qu'il comporte.

Les atomes de plutonium se fissionnent lorsqu'ils sont bombardés par des neutrons dans une plage d'énergie assez large qui va des neutrons thermiques aux neutrons rapides. Les atomes dont le nombre de masse est impair (239, 241) se fissionnent plus facilement que les atomes aux nombres de masse pairs (238, 240 et 242), en particulier dans les REO où il y a essentiellement des neutrons thermiques. Dans ce cas, les isotopes pairs du plutonium plus ^{241}Am sont des poisons neutroniques qui doivent être pris en compte dans le calcul de la valeur de réactivité nécessaire pour le combustible MOX destiné aux REO. Dans le cas des réacteurs rapides, tous les isotopes du plutonium sont fissiles, mais ^{241}Am agit toujours comme un poison neutronique. C'est pourquoi les réacteurs rapides sont une solution plus satisfaisante que les réacteurs thermiques (par exemple, les REO) si l'on veut exploiter efficacement le plutonium.

Toutefois, un monorecyclage du plutonium dans les REO existants offre la possibilité d'augmenter de 20 à 30 % l'énergie produite par la charge initiale d'uranium. La démonstration à échelle industrielle a été faite et la technique est de plus en plus utilisée. Le plutonium issu du retraitement du combustible des réacteurs graphite-gaz ou du combustible des réacteurs Candu/à eau lourde sous pression, s'il était envisagé, aurait de meilleures propriétés pour le recyclage sous forme de MOX dans les REO.

Lorsque l'on traite le combustible irradié par les technologies actuelles, tous les constituants sont séparés en trois flux : le flux d'uranium, le flux de plutonium et le flux de produits de fission et d'autres actinides. Les flux d'uranium et de plutonium passent par des procédés de purification supplémentaires de sorte que l'oxyde résultant est extrêmement pur. Dans le cas du plutonium, certains isotopes à vie relativement courte sont présents, et sa composition isotopique change, sous l'effet de sa décroissance radioactive, lors de son entreposage ultérieur. La décroissance du ^{241}Pu en ^{241}Am revêt une importance particulière si l'on envisage de réutiliser le plutonium.

Si l'on devait entreposer pendant 15 ans le plutonium tiré du retraitement du combustible REO, le ^{241}Pu hautement fissile, et donc précieux, qu'il contient passerait, par décroissance, de 15 à 5 % du total tandis que la teneur en ^{241}Am indésirable s'élèverait à près de 10 %. Par conséquent, plus l'on entrepose longtemps le plutonium séparé, moins il est fissile et plus les contraintes radiologiques sont importantes lorsque l'on doit finalement fabriquer du combustible MOX destiné à des REO ou des réacteurs rapides à partir de ce plutonium et de l'américium qu'il renferme.

L'intérêt économique du plutonium est un sujet d'une grande complexité qui dépend pour beaucoup du système de réacteur dans lequel il pourrait être exploité. À l'évidence, il faut prendre des précautions radiologiques nettement plus contraignantes pour entreposer, transporter, manipuler et fabriquer du combustible à base de plutonium qu'à base d'uranium. Ces précautions ainsi que les obligations de comptabilisation du plutonium qu'il convient de respecter conformément aux garanties internationales et aux normes de sûreté-criticité, font que le coût de la fabrication du combustible MOX est nettement plus élevé que celui de la fabrication du combustible à l'uranium.

Le lecteur trouvera une analyse détaillée des coûts des diverses étapes du cycle du combustible MOX dans des publications antérieures de l'AEN (AEN, 1989 et 1994). Dans ce dernier ouvrage, la valeur du plutonium récupéré lors du retraitement du combustible a été calculée par la méthode dite d'indifférence décrite brièvement ci-dessous. Étant donné les récents changements spectaculaires des technologies du combustible et du cycle ainsi que l'évolution des prix de l'uranium, il paraîtrait tout à fait justifié de procéder à une mise à jour de ces études économiques.

Si l'on compare le coût de la production d'un assemblage combustible MOX pour REP à celui d'un assemblage combustible équivalent fabriqué avec de l'uranium faiblement enrichi, on peut obtenir la valeur de la teneur en plutonium de l'assemblage MOX qui correspond au seuil de

rentabilité économique. Cette méthode a donné une valeur de 5 USD par gramme de Pu fissile pour un prix de l'uranium de 70 USD/kg U.

Lorsque l'on a calculé la valeur du plutonium par la méthode d'indifférence dans l'étude de 1994, on n'a pas tenu compte du coût substantiel de l'entreposage du plutonium, ce qui pourrait être considéré comme un défaut de l'étude sachant l'importance de ce coût. Si l'on en tient compte, et on y ajoute la perte de valeur fissile qui intervient pendant l'entreposage, il apparaît nettement plus intéressant d'un point de vue économique et technique de recycler le plutonium le plus vite possible après sa séparation dans l'usine de retraitement.

Malgré cela, il reste des quantités considérables de plutonium séparé qui ont été entreposées sur de longues périodes, au Royaume-Uni en particulier, mais aussi dans d'autres pays. Au Royaume-Uni, le recyclage précoce du plutonium issu du retraitement du combustible Magnox dans du combustible MOX destiné aux centrales à réacteurs à gaz avancés n'a pas convaincu pour des raisons techniques et économiques. Maintenant qu'une partie de l'industrie nucléaire a été privatisée, le transfert de la propriété juridique du plutonium interviendra dans l'équation.

La dimension sociétale devrait également jouer un rôle important dans les futures décisions concernant l'utilisation du plutonium. Certains problèmes que pose l'utilisation du plutonium, inquiètent la société civile. Il s'agit de la sécurité, de la protection physique et des impératifs des garanties internationales. L'industrie nucléaire mais aussi les États qui souhaitent mettre en œuvre des stratégies efficaces de recyclage du plutonium, à l'échelle nationale ou internationale, devront répondre à ces préoccupations.

Malgré les obstacles politiques et sociaux qui s'opposent à la création d'un marché du plutonium, les avancées et le succès de l'introduction du plutonium de qualité militaire dans le cycle nucléaire civil pourraient être l'occasion de faire accepter plus largement le recyclage. En outre, le développement durable, concept que les décideurs évoquent de plus en plus souvent, rehausse l'intérêt des solutions de recyclage qui permettent d'exploiter de manière efficace des ressources naturelles dont les quantités sont limitées. Une politique nucléaire qui respecte les critères du développement durable devrait favoriser et encourager la mise en œuvre des cycles fermés.

Références

Bairiot, H. and K. Fukuda (2005), *Reprocessed Uranium (RepU) Issues*, in IAEA Technical Meeting on Fissile Material Management Strategies, 12-15 September 2005, AIEA, Vienne, Autriche.

Herring, J.S. *et al.*, [*Low cost, Proliferation Resistant, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for LWRs*], Private Communication.

AIEA, *Système d'information sur le cycle du combustible nucléaire NFCIS*, www-nfcis.iaea.org.

AEN et AIEA (2006), *Uranium 2005: Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire

(2006), *Cycles du combustible nucléaire avancés et gestion des déchets radioactifs*, OCDE, Paris, France.

(2003), *Plutonium Management in the Medium Term – A Review by the OCDE/AEN Working Party on the Physics of Plutonium Fuels and Innovative Fuel Cycles (WPPR)*, OCDE, Paris, France.

(2002a), *Le cycle du combustible nucléaire – aspects économiques, environnementaux et sociaux*, OCDE, Paris, France.

(2002b), *Physics of Plutonium Recycling, Volume VI: Multiple Plutonium Recycling in Advanced PWRs*, OCDE, Paris, France.

(2002c), *Advanced Reactors with Innovative Fuels*, Workshop Proceedings, Chester, United Kingdom, October 2001, OCDE, Paris, France.

(2002d), *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, A Comparative Study*, OCDE, Paris, France.

(2001), *Gestion de l'uranium appauvri*, OCDE, Paris, France.

(1999), *Advanced Reactors with Innovative Fuels*, Workshop Proceedings, Villigen, Switzerland, October 1998, OCDE, Paris, France.

(1997), *La gestion du plutonium séparé : Les options techniques*, OCDE, Paris, France.

(1995), *La physique du recyclage du plutonium : Enjeux et perspectives*, Volume 1, OCDE, Paris, France.

(1994), *Les aspects économiques du cycle du combustible nucléaire*, OCDE, Paris, France.

(1989), *Le combustible au plutonium – Une évaluation*, OCDE, Paris, France.

Comité AEN de la physique des réacteurs (1986), *Uranium Recycling Benchmark*, AENCRP-L-293, OCDE/AEN, Paris.

Radkowski *et al.*, (1998), « The Non-proliferative Light Water Thorium Reactor: a New Approach to LWR Technology », *Nuclear Technology*, 124:215-22.

Chapitre 3

MODES DE GESTION

3.1 Introduction

Trois solutions principales s'offrent aux exploitants d'installations nucléaires et aux décideurs pour gérer les matières fissiles et fertiles produites aux diverses étapes du cycle du combustible ou démilitarisées et utilisables à des fins civiles : le stockage définitif, l'entreposage de longue durée et le recyclage. Toutefois, suivant la politique nationale et/ou la technologie et l'infrastructure disponibles dans le pays, certaines options peuvent se révéler irréalisables dans certains contextes. Par exemple, les pays où le retraitement est interdit par la loi ne peuvent pas recycler. De plus, l'entreposage de longue durée n'est qu'une solution provisoire. Les décideurs qui optent pour cette démarche seront contraints, un jour ou l'autre, d'opter pour le stockage définitif ou le recyclage.

Les matières fissiles et fertiles qui peuvent être recyclées se classent en deux catégories : d'un côté, l'uranium, le plutonium et le thorium séparés et, de l'autre, le combustible utilisé. Ce dernier doit être retraité avant son recyclage tandis que les matières séparées peuvent être utilisées plus facilement pour d'autres usages bien que, dans certains cas, celui de l'UHE par exemple, un traitement préalable s'impose également. L'inventaire des matières recyclables a été donné en section 2.2. Les problèmes techniques et stratégiques soulevés par la gestion de ces matières diffèrent en fonction de leur caractéristiques et de leurs états physiques et chimiques. Le présent chapitre est consacré à l'analyse des aspects techniques et stratégiques des deux solutions de long terme, à savoir le stockage définitif et le recyclage.

3.2 Stockage

Le choix du stockage suppose que l'on considère comme déchets, du moins temporairement, les matières à stocker. L'entreposage de longue durée et le stockage réversible permettent de revenir sur la décision et, le cas échéant, de récupérer les matières entreposées pour les réutiliser. Le stockage est envisagé principalement pour le combustible utilisé, mais il peut éventuellement s'appliquer aux matières fissiles et fertiles séparées. La solution du stockage direct réduit dans de fortes proportions la quantité d'énergie extraite des ressources naturelles. Si cette option était adoptée dans un scénario de poursuite du recours à l'énergie nucléaire, l'approvisionnement en uranium pourrait commencer à poser problème avant le milieu du siècle si on considère uniquement les ressources connues actuellement. Cependant, des nouvelles ressources d'uranium exploitables sont susceptibles d'être identifiées grâce à des efforts accrus d'exploration si la demande et les prix des marchés augmentent. En outre, l'entreposage de longue durée et le stockage réversible offrent la possibilité de revenir sur la décision initiale le cas échéant et de récupérer les matières stockées ou entreposées pour les utiliser.

Actuellement, il n'existe pas de dépôt en service pour le stockage des déchets de haute activité y compris le combustible utilisé non retraité et celui-ci doit être entreposé jusqu'à l'ouverture de tels dépôts. À sa sortie des réacteurs de puissance, le combustible irradié est habituellement entreposé dans un premier temps dans des piscines qui se trouvent sur les sites des réacteurs, le temps que décroisse

sa radioactivité élevée. L'eau évacue la chaleur du combustible usé et joue également le rôle de protection contre le rayonnement gamma intense du combustible qui vient d'être déchargé.

Pour l'entreposage du combustible usé après son refroidissement dans les piscines des réacteurs, il existe trois solutions : l'entreposage en piscine, à sec ou dans des alvéoles. Les technologies employées sont au point, fiables et sûres. Quelle que soit la solution choisie, l'exploitant doit prouver que toute dégradation potentielle du combustible due au temps, à la température, à la radioactivité, à l'oxygène ou à un changement dans l'environnement ambiant n'interdira pas la possibilité de récupérer et de traiter le combustible. De plus, il importe de tenir à jour, pour pouvoir s'en servir à la fin de la période d'entreposage, toutes les archives et la documentation correspondante sur le combustible et les systèmes d'entreposage. On risque également d'avoir besoin d'informations sur l'historique du combustible et la façon dont il a été entreposé pour pouvoir déterminer s'il est possible de le traiter et de le transporter conformément à la réglementation en vigueur.

Les trois méthodes sont utilisées dans différents pays (voir tableau 3.1) ; certains en emploient plusieurs. L'entreposage en piscine est aujourd'hui la technique la plus répandue, mais l'entreposage à sec dans des alvéoles ou des conteneurs a peu à peu gagné en maturité et est aujourd'hui envisagé par un nombre croissant de pays et de compagnies d'électricité.

Tableau 3.1 Solutions pour l'entreposage du combustible usé dans divers pays

Option	Pays utilisant ce système
Piscine	Allemagne, Belgique, États-Unis, Finlande, France, Japon, Royaume-Uni et Suède
Conteneur à sec	Allemagne, Belgique, Canada, États-Unis, Japon, Russie, Suisse
Alvéole à sec	Hongrie, Royaume-Uni

Le stockage du combustible usé en piscine est la solution la plus courante (plus de 90 % du combustible usé dans le monde aujourd'hui est entreposé dans des piscines). Une partie de ce combustible est ainsi entreposée depuis plusieurs dizaines d'années. Les combustibles à base d'oxydes n'ont jusqu'à présent présenté aucun problème particulier mais l'on sait que l'entreposage en piscine présente davantage de difficulté si le combustible est métallique.

Les avantages de la technologie d'entreposage en piscine tiennent à la protection, à l'efficacité du refroidissement et à la facilité d'inspecter le combustible. Les assemblages de combustible usé sont normalement placés dans des râteliers installés dans une piscine en béton revêtu. Les principaux problèmes de sûreté que pose ce type d'entreposage concernent le risque de réaction nucléaire en chaîne accidentelle dans la piscine, que l'on évite en espaçant suffisamment les assemblages et en veillant à assurer une absorption neutronique satisfaisante et le maintien d'un niveau d'eau suffisant pour couvrir le combustible. Ce type d'entreposage présente l'inconvénient d'exiger une maintenance lourde pour conserver la capacité de refroidissement qui permettra d'éviter l'altération du combustible, modifier la chimie de l'eau par des opérations telles que l'ajout de bore, la purification par échange d'ions, la filtration, et inspecter les parois afin de détecter toute fuite éventuelle.

Il est nécessaire de contrôler la chimie de l'eau de la piscine pour limiter tout risque de corrosion de la gaine du combustible et préserver l'intégrité de ce dernier. Il est fréquent d'entreposer le combustible dans des conteneurs afin d'éviter la corrosion et de faciliter les manipulations. Par ailleurs, une surveillance minutieuse s'impose pour détecter les fuites et la radioactivité dans l'eau est maintenue aux niveaux les plus faibles qu'il soit raisonnablement possible d'atteindre. Comme la gaine est la première barrière de confinement, il importe d'en empêcher la corrosion dans les piscines, ce qui ajoute à la complexité technique de l'entreposage en piscine, à savoir la chimie de l'eau et son contrôle. L'entreposage sous eau d'un combustible doté d'une gaine en alliage de zirconium, ce qui est

le cas du combustible des REP, ne pose normalement pas de problème même si la chimie de l'eau est mauvaise et, bien que les gaines en acier inoxydable des combustibles de REO aient en général des taux de corrosion nettement supérieurs, la corrosion de la gaine n'est pas considérée comme un facteur limitatif de l'entreposage sur une durée pouvant atteindre 100 ans.

Cependant, la tendance actuelle dans le monde est à des méthodes d'entreposage à sec plus robustes. Certains pays comme l'Allemagne et les États-Unis ont déjà transféré leur combustible usé dans des entrepôts à sec. Pour ce faire, il existe deux principaux procédés de séchage aujourd'hui : le séchage sous vide employé par l'Allemagne, le Canada, l'Espagne et les États-Unis et le séchage sous gaz chaud, utilisé par le Canada, la République de Corée et la Hongrie. Le séchage sous vide permet d'abaisser un certain temps la pression du gaz de couverture en dessous de la pression de vapeur de l'eau à la température de séchage et peut durer très longtemps ou exiger des méthodes plus complexes si l'on est en présence d'importantes quantités d'eau résiduelle ou de combustible déjà refroidi. La technique de séchage sous gaz chaud consiste à chauffer uniformément l'assemblage combustible (de 90 à 150°C normalement) dans un flux de gaz chaud pour évaporer l'eau.

Les entrepôts à sec sont normalement constitués d'un important bâtiment en béton dont la structure externe sert de protection radiologique et l'intérieur est constitué d'un grand nombre d'alvéoles, ou de casemates, capables de recevoir le combustible usé. La chaleur est évacuée par convection naturelle ou forcée de l'air. On peut prévoir, si nécessaire, un contrôle de la température, de l'humidité et de la teneur en chlore de l'air de ventilation pour optimiser les conditions d'entreposage de façon à préserver l'intégrité de l'assemblage combustible. Le combustible est souvent entreposé dans des tubes métalliques ou des fûts d'entreposage scellés qui peuvent contenir un ou plusieurs assemblages combustibles. Ces conteneurs assurent le confinement des substances radioactives que renferme le combustible usé.

Les entrepôts à sec fonctionneront à des températures supérieures aux piscines, mais leurs capacités de gestion de la chaleur sont meilleures que celles des conteneurs. Il faut toutefois refroidir le combustible avant de le charger dans un alvéole : un assemblage combustible de REO (taux de combustion d'environ 45 GWj/t) peut exiger un pré-refroidissement d'à peu près trois ans. Ces températures plus élevées nécessitent également de faire très attention aux mécanismes de corrosion de la gaine et au fluage thermique. De plus, le chargement thermique lié à ces taux de combustion plus élevés pourrait imposer des contraintes pour l'entreposage en alvéoles.

S'il revient cher au départ de construire un alvéole, le coût de l'agrandissement d'un alvéole pour en augmenter la capacité est marginal. Étant donné les économies d'échelle ainsi réalisables, le coût unitaire d'un alvéole, au cas où l'on entreposerait de très grandes quantités de combustible usé dans une même installation, serait légèrement inférieur à celui des autres modes d'entreposage à sec.

Dans un système d'entreposage en conteneurs à sec, un radier en béton est installé en plein air ou à l'intérieur d'un bâtiment et l'on peut ajouter de grands fûts contenant le combustible usé au fur à mesure des besoins. Les conteneurs assurent à la fois le confinement et la protection radiologique. Le coût initial de l'installation est assez faible, et les coûts d'exploitation, une fois les conteneurs de combustible installés, sont également limités. Ce n'est pas le cas des coûts en capital des conteneurs eux-mêmes ; chacun de ces conteneurs d'entreposage coûtant à peu près le même prix que les conteneurs antérieurs, les économies d'échelle réalisées au cours de l'entreposage sont très faibles. Plusieurs fabricants proposent sur le marché un grand choix de conceptions de conteneurs dont des conteneurs en métal et en béton (ces derniers possèdent en général une doublure interne métallique). À l'origine, ces conteneurs étaient conçus pour l'entreposage seulement. Depuis peu, certains conteneurs ont bénéficié d'une autorisation valable pour l'entreposage et le transport et l'on cherche aujourd'hui à mettre au point des conteneurs qui servent à la fois à l'entreposage, au transport et au stockage définitif.

Le conteneur en béton VSC-24 en service aux États-Unis mesure 5,6 m de haut sur 3,5 m de diamètre et pèse 132 tonnes à plein. Il peut contenir jusqu'à 17 tonnes de combustible usé. La plupart des conteneurs métalliques sont scellés donc dépourvus de ventilation, ce qui signifie que le refroidissement s'effectue par rayonnement direct et convection de l'air sur les surfaces externes du conteneur par opposition à une convection interne de l'air. Les conteneurs métalliques ont des conductibilités thermiques supérieures à celles des conteneurs en béton. La température dans les conteneurs est plus élevée que dans les casemates ou alvéoles car le refroidissement des conteneurs est moins efficace notamment s'ils sont en béton armé plutôt qu'en fonte malléable. Les températures maximales admissibles du gainage du combustible irradié pour que le conteneur puisse continuer d'assurer le confinement peuvent varier de moins de 250°C à 364°C, les températures les plus élevées étant celles autorisées dans les conteneurs en béton. Le faible refroidissement du combustible dans les conteneurs exige un pré-refroidissement plus long avant de pouvoir charger le conteneur. À titre d'exemple, un combustible usé de REO porté à un taux de combustion élevé (d'environ 45 GWj/t) peut exiger un pré-refroidissement d'une dizaine d'années.

Toutes les techniques de stockage imposent une approche fondée sur la défense en profondeur ou des systèmes multi-barrières pour isoler les déchets radioactifs. Avant que le combustible usé ne soit expédié dans un dépôt, il convient de le conditionner pour en faciliter la manutention et la mise en dépôt. Le conditionnement garantit également que le combustible est stocké dans l'environnement qui limitera le mieux la dégradation du combustible et la diffusion de la radioactivité. Toutefois, il est courant, dans les modèles de calcul des dépôts en formation géologique, de ne pas prendre en compte totalement le confinement assuré par le colis pendant la durée de vie du dépôt par souci de prudence. L'intégrité de ce colis aura davantage d'importance si la politique de stockage prévoit une reprise éventuelle des déchets.

Bien que l'on n'ait pas encore conditionné de combustible usé en vue de son stockage définitif, des plans à cet effet sont à l'étude. Toute méthode existante ou en gestation pour les DFA, DMA ou d'autres DHA sera envisagée pour le combustible usé. Parmi les moyens étudiés dans le monde pour conditionner le combustible usé avant son stockage, on retiendra : le ciment, le verre, les céramiques de phosphate, le métal fondu, des polymères organiques ou inorganiques, les zéolites synthétiques, le bitume ou le Sinroc (c'est-à-dire la compression à chaud sous pression isostatique), ainsi que des surconteneurs en acier, des céramiques de verre, l'incinération et la fusion à haute température.

Il existe un consensus parmi les experts des pays membres de l'OCDE pour considérer que le stockage du combustible usé et des déchets de haute activité en formation géologique est une solution fiable et sûre pour les générations actuelles et futures. Le stockage en formation géologique implique la mise en place d'un « système multi-barrières » qui consiste à intégrer à la conception du système une combinaison de barrières ouvragées et naturelles (par exemple les conteneurs, les matériaux de remblayage) empêcher l'eau contenue d'atteindre les déchets pendant des milliers d'années et, inversement, empêcher le transport des radionucléides dans l'environnement au moment où les déchets se refroidissent et où leur radioactivité décroît. Les dépôts seront accessibles par des puits ou des galeries inclinées qui seront fermés et scellés une fois tous les déchets mis en place. La construction et le remplissage d'un dépôt devraient durer plusieurs dizaines d'années, parfois plus longtemps dans des pays détenant d'importantes quantités de déchets à vie longue.

Les déchets seront conditionnés dans des conteneurs adaptés (acier inoxydable, alliage de cuivre) qui eux-mêmes seront installés dans des puits verticaux peu profonds pratiqués dans le sol de la galerie du dépôt ou, au contraire, horizontalement sur le sol. La galerie sera finalement remblayée. Dans tous les cas, les déchets seront entourés d'argile, de bentonite ou de roche broyée.

La mise en place des déchets interviendra à des profondeurs variant de 250 à 1 500 mètres en fonction du concept adopté et de la roche hôte. L'aménagement d'un dépôt en formation géologique par les techniques standard minières et de génie civil sera probablement réservé à des sites accessibles (c'est-à-dire à terre ou près des côtes). Le sel, l'argile, le granit et le tuf sont les types de roche proposés actuellement dans les différents pays car la circulation des eaux souterraines y est faible.

Dans les premiers concepts de dépôt en formation géologique, il était envisagé de remblayer et de fermer les dépôts le plus tôt possible après l'installation des déchets. Plusieurs pays se tournent aujourd'hui vers ce que l'on appelle des « concepts de stockage progressifs » où la décision de fermer et de sceller définitivement le dépôt est reportée loin dans le temps. Une surveillance s'exercera pendant que le dépôt restera ouvert, et les déchets se trouveront dans un état permettant de les retirer facilement le cas échéant. De cette manière on peut acquérir peu à peu confiance dans la méthode de stockage et prendre les décisions concernant la conception finale et la fermeture à la lumière de l'expérience acquise pendant la durée de vie du dépôt plutôt que de devoir faire son choix dès le début. Tant que le dépôt n'est pas scellé, les travailleurs et le public sont davantage exposés à des risques d'incendie, d'inondation et à d'autres catastrophes naturelles. Plusieurs pays ont établi des dossiers de sûreté. Les dossiers récents ont été, pour la plupart, expertisés par des équipes internationales de spécialistes de la gestion des déchets radioactifs et jugés solides.

À court terme, plus la fermeture du dépôt intervient tôt après l'installation des déchets, moindre est le coût. Toutefois, les coûts à plus long terme dépendent des modes de surveillance et des fonds prévus pour les aléas. En principe, ces fonds doivent suffire à payer la reprise de toutes les substances nucléaires. Le stockage en formation géologique a la faveur des spécialistes notamment parce qu'il libère les générations futures de toute responsabilité et parce que cette solution présente une grande stabilité en cas d'évolution du contexte sociopolitique. Toutefois, ces avantages n'ont de réalité que lorsque le dépôt est fermé. Un dépôt qui reste ouvert quelques années, en revanche, a ceci d'intéressant que le combustible peut en être retiré assez facilement et à peu de frais en cas d'accident ou si l'on souhaite le recycler. À titre d'exemple, les États-Unis ont aujourd'hui l'intention de laisser leur dépôt ouvert au moins 50 ans pour en assurer la ventilation et abaisser la température, après quoi ils le fermeront. Pour l'heure, il n'est pas prévu de remblayer les galeries de stockage, une opération qui pourrait se révéler nécessaire pour éviter que la chute de pierres n'endommage les conteneurs ou pour interdire la pénétration d'eau.

3.3 Recyclage

Le recyclage a pour objectifs principaux de mieux exploiter le contenu énergétique des ressources naturelles et de diminuer les volumes et la toxicité des déchets. Recycler toutes les matières fissiles et fertiles de la planète permettrait de récupérer une grande quantité d'énergie dans les décennies qui viennent. L'annexe C sur les scénarios de déploiement de l'énergie nucléaire et les besoins en uranium correspondants donne une indication de l'importance de la demande que devra satisfaire l'industrie dans quelques dizaines d'années. En outre, le recyclage des matières fissiles et fertiles permet de réduire les quantités de plutonium et d'actinides mineurs à stocker en fin de parcours et donc d'alléger la gestion à long terme des déchets radioactifs.

L'efficacité du recyclage dépend des systèmes nucléaires utilisés et du moment où ils sont déployés. Les réacteurs exploités aujourd'hui resteront en service jusqu'en 2020-2050 et seront remplacés par des réacteurs qui eux seront exploités jusqu'à la fin du siècle. Les performances des réacteurs de la prochaine génération auront donc une influence déterminante sur l'efficacité du recyclage.

3.3.1 Aspects physiques du recyclage

L'efficacité du recyclage dépendra des performances du système adopté en termes de volume des déchets, de réduction de la radiotoxicité et de quantité d'énergie produite. Le bilan de réactivité plaide en faveur d'un recyclage dans un spectre de neutrons rapides parce que tous les isotopes y sont plus fissiles (voir tableau 3.2 dérivé de Varaine, *et al.*, 2005). De plus, la transmutation des actinides mineurs, qui produit des résidus moins radiotoxiques et de période plus courte, est plus efficace dans un spectre de neutrons rapide.

Tableau 3.2 Sections efficaces neutroniques à un groupe

Isotope	Spectre thermique			Spectre rapide		
	σ_f	σ_c	$\alpha = \sigma_c/\sigma_f$	σ_f	σ_c	$\alpha = \sigma_c/\sigma_f$
²³⁵ U	38,80	8,70	0,22	1,98	0,57	0,29
²³⁸ U	0,103	0,86	8,30	0,04	0,30	7,50
²³⁹ Pu	102,00	58,70	0,58	1,86	0,56	0,30
²⁴⁰ Pu	0,53	210,20	396,60	0,36	0,57	1,60
²⁴¹ Pu	102,20	40,90	0,40	2,49	0,47	0,19
²⁴² Pu	0,44	28,80	65,50	0,24	0,44	1,80
²³⁷ Np	<u>0,52</u>	<u>33,00</u>	63	<u>0,32</u>	<u>1,70</u>	5,30
²⁴¹ Am	<u>1,10</u>	<u>110,00</u>	100,00	<u>0,27</u>	<u>2,00</u>	7,40
²⁴³ Am	<u>0,44</u>	<u>49,00</u>	111,00	<u>0,21</u>	<u>1,80</u>	8,60
²⁴⁴ Cm	1,00	16,00	16,00	0,42	0,60	1,40
²⁴⁵ Cm	116,00	17,00	0,15	5,10	0,90	0,18

Outre les sections efficaces, il faut tenir compte du potentiel neutronique pour pouvoir calculer le nombre de neutrons disponibles pour les processus de transmutation ou de surgénération (voir tableau 3.3). Cette méthode (méthode de calcul des valeurs de D, Salvatores, *et al.*, 1996 et 1997) permet d'évaluer la capacité de fonctionner dans des conditions critiques et de produire l'excédent de neutrons nécessaire à la transmutation. Elle est basée sur une approche probabilistique appliquée au cœur à l'équilibre. Le tableau 3.3 montre que le spectre de neutrons rapides fournit en bilan neutronique positif pour les actinides mineurs et le plutonium, rendant possible la transmutation de ces isotopes.

Les analyses de physique des réacteurs démontrent que le spectre de neutrons rapide est adapté à un recyclage de toutes les matières, contrairement au spectre de neutrons thermique qui impose certains coefficients de réactivité et des besoins en matières fissiles limitant leurs possibilités de recyclage.

Tableau 3.3 Valeurs de D pour les actinides mineurs dans des spectres de neutrons thermiques et rapides

Isotope/élément	Spectre thermique	Spectre rapide
Actinides mineurs	-1,2	+0,4
Pu + actinides mineurs	-0,2	+0,9
Produits de fission à vie longue (PFVL)	-2,3	-2,2
Isotopes de PFVL	-0,6	-0,6

3.3.2 Évaluation des options de recyclage

L'évaluation des options de recyclage, pour être complète, exige une analyse des caractéristiques physiques du réacteur qui permette de juger de la manière la plus efficace d'utiliser et de recycler les matières pour économiser les ressources ou effectuer des transmutations ainsi qu'une étude de l'ensemble du système nucléaire, avec son cycle de combustible.

On peut recycler les matières fissiles et fertiles (uranium et plutonium) soit dans des réacteurs à eau ordinaire soit dans des réacteurs rapides. Pour la transmutation des actinides mineurs, deux solutions sont envisageables : le recyclage homogène et le recyclage hétérogène. Dans le recyclage homogène, l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs sont traités ensemble. Lorsqu'on choisit le recyclage hétérogène, l'uranium et le plutonium (neptunium) sont traités séparément des actinides mineurs – américium, curium (neptunium) – qui sont transmutés dans des combustibles ou cibles particuliers.

Sachant que le spectre de neutrons rapide est plus efficace pour la transmutation et impose moins de contraintes, on n'envisage pas de recycler les actinides mineurs dans des réacteurs à eau ordinaire ou dans d'autres réacteurs à spectre de neutrons thermique. Si cette solution devait être envisagée, cela aurait des répercussions très importantes sur les caractéristiques requises pour le cycle du combustible.

Dans les réacteurs à eau ordinaire avec spectre de neutrons thermique, les principales matières fissiles qui peuvent être recyclées sont l'uranium et le plutonium. Pour les réacteurs de la génération actuelle, les économies sur les ressources peuvent être estimées de la manière qui suit :

- 5 % en relevant le taux de combustion et la proportion de combustible rechargé ;
- 20 % en réduisant la teneur en uranium 235 de l'uranium appauvri ;
- 20 % en recyclant l'uranium et le plutonium irradiés ;
- 5 à 10 % en améliorant les performances du réacteur (réflecteurs lourds, rendement thermique, etc.) ; et
- 5 à 10 % en améliorant le facteur de conversion dans le réacteur.

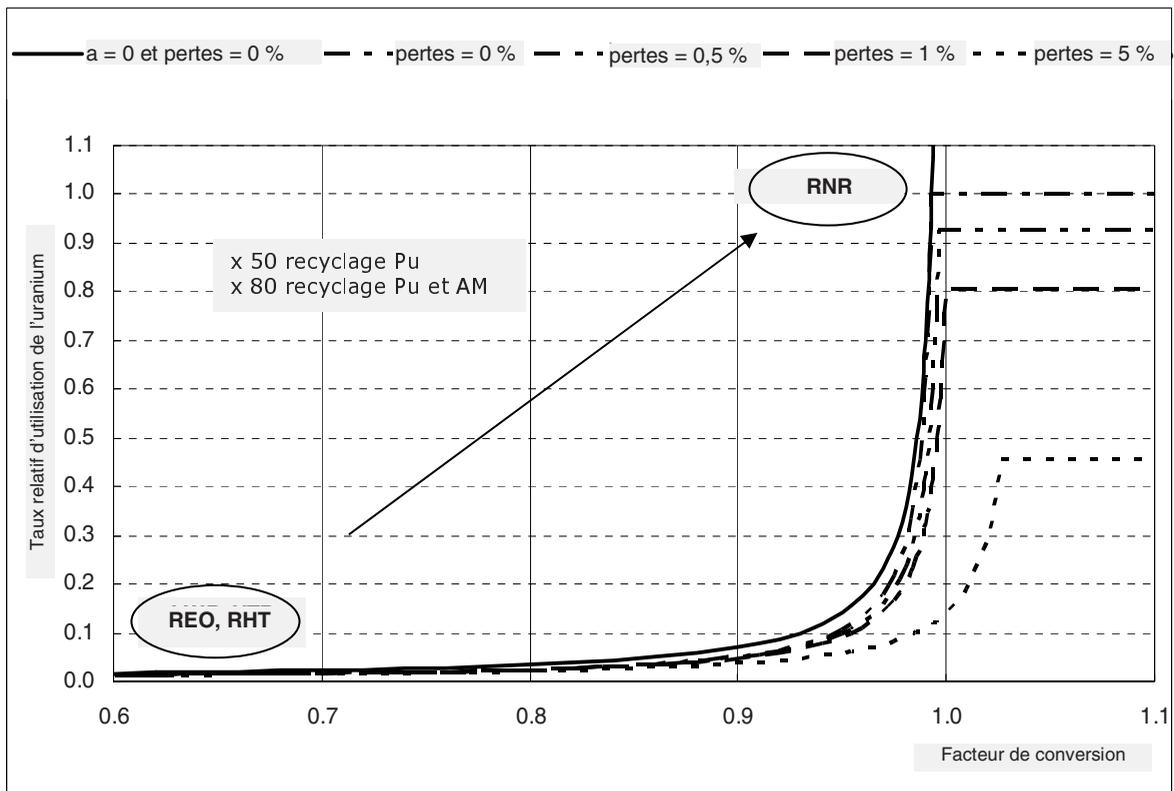
De cette manière, le recyclage de l'uranium et du plutonium dans les réacteurs à eau ordinaire de la génération actuelle peut, au mieux, abaisser de 50 % la consommation d'uranium par rapport au cycle direct actuel. Les autres moyens de réduire la consommation d'uranium des réacteurs de la génération actuelle incluent l'accroissement de l'efficacité thermique, du facteur de disponibilité et du taux d'irradiation des combustibles.

En revanche, le recyclage des matières fissiles et fertiles dans des réacteurs à neutrons rapides permet de consommer toutes les matières disponibles et de régénérer *in situ*, les produits de fission étant retirés après irradiation. Comme un réacteur rapide consomme 10 à 15 tonnes de plutonium par GWe de puissance installée, le plutonium produit par un réacteur à eau ordinaire au cours de sa vie suffit à démarrer un réacteur rapide de même puissance. De plus, l'uranium issu du retraitement du combustible usé d'un réacteur à eau ordinaire suffit à faire fonctionner un réacteur rapide de même puissance pendant plusieurs milliers d'années.

À supposer que l'on utilise les stocks actuellement disponibles de plutonium et d'uranium hautement enrichi, on pourrait installer des réacteurs à neutrons rapides d'une puissance de 150 GWe et continuer de produire de l'électricité plus de 5 siècles en remplaçant les anciens surgénérateurs par des nouveaux lorsqu'ils parviendraient en fin de vie sans avoir jamais besoin d'uranium frais.

Toutefois, cette option ne sera envisageable que lorsque l'on possédera un système à neutrons rapides techniquement éprouvé économiquement concurrentiel.

Figure 3.1 Rendement d'utilisation des ressources en fonction du facteur de conversion



Comme le montre la figure 3.1, l'introduction de réacteurs rapides dans un parc permet d'extraire nettement plus d'énergie de l'uranium naturel qu'avec un parc de réacteurs à eau ordinaire en cycle ouvert. Le facteur de multiplication obtenu dépend de nombreux paramètres dont le facteur de conversion des réacteurs à neutrons rapides, le rythme d'introduction de ces réacteurs ainsi que les pertes au cours des opérations du cycle du combustible. La figure montre l'importance de la quantité d' ^{235}U contenue dans l'uranium appauvri ($a = 0\%$ ou $0,3\%$) et des pertes au cours du retraitement et du recyclage (0% , $0,5\%$, 1% et 5%).

3.3.3 Stratégies de recyclage

Le cycle du combustible entièrement fermé a pour objectif ultime de recycler les éléments transuraniens, opération pour laquelle les systèmes à réacteurs à neutrons rapides sont les plus efficaces. La figure 3.2 illustre un concept de cycle fermé à réacteur rapide (RNR).

Le principal avantage du recours à des RNR tient à la réduction spectaculaire non seulement de la demande cumulée d'uranium, mais aussi des volumes et de la radiotoxicité des déchets de haute activité à stocker en fin de parcours. De ce point de vue, le cycle à RNR peut contribuer de manière significative à la sécurité d'approvisionnement en énergie nationale et à la durabilité des systèmes nucléaires.

Figure 3.2 Cycle du combustible fermé

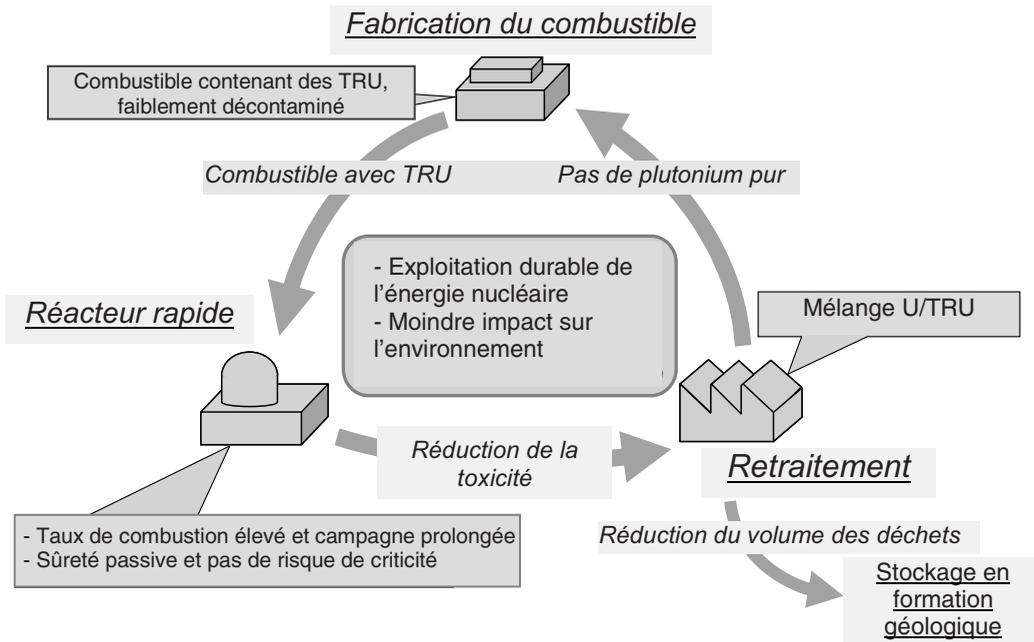
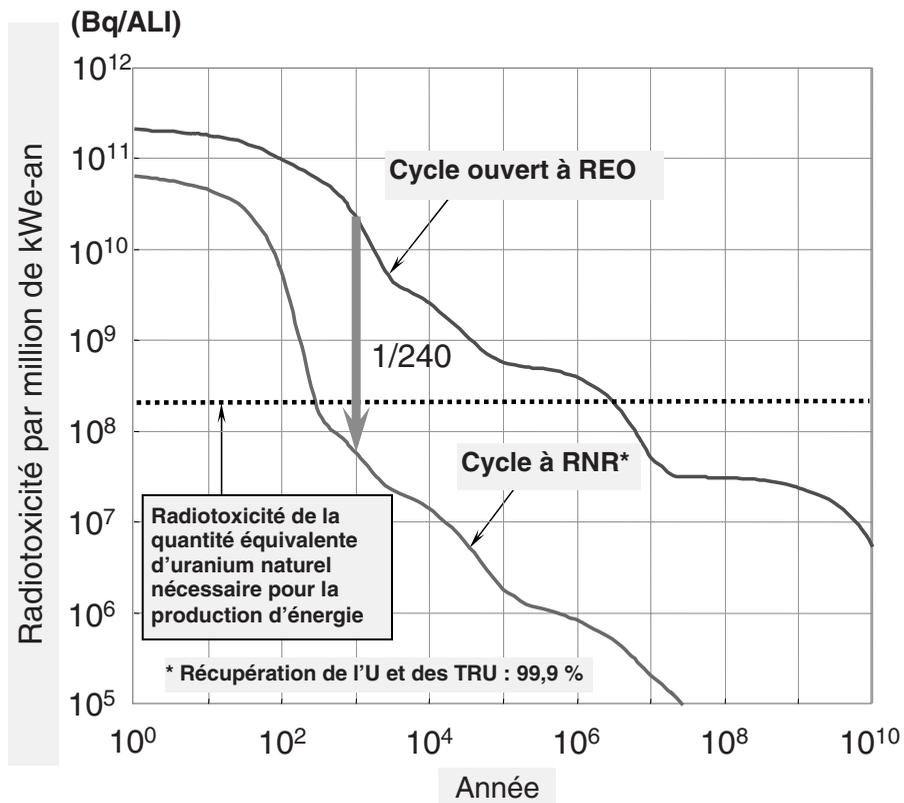


Figure 3.3 Radiotoxicité des DHA produits dans le cycle ouvert à REO et dans le cycle fermé à RNR



La figure 3.3 compare la radiotoxicité à long terme des DHA provenant des cycles à RNR et des cycles ouverts à REO. La ligne en pointillé correspond au niveau de radiotoxicité de la quantité d'uranium naturel nécessaire pour alimenter un REO de 1 GWe pendant un an. Au bout de 1 000 années d'entreposage/stockage, la radiotoxicité des déchets dans le cycle à RNR représente environ $1/240^{\text{ième}}$ de celle des déchets d'un cycle ouvert à REO.

Partant de la situation actuelle, la stratégie de recyclage pourrait être mise en œuvre en trois étapes successives pour, en fin de compte, atteindre l'objectif ultime d'un cycle entièrement fermé : recyclage dans des réacteurs thermiques ; transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides ; déploiement complet des systèmes à neutrons rapides.

Dans une première étape, qui pourrait durer une vingtaine d'années le temps que la technologie du système à réacteur rapide soit parfaitement au point, le plutonium serait recyclé dans des réacteurs à eau ordinaire. Continuer d'exploiter le cycle REO ouvert accentuerait la demande totale d'uranium naturel et l'accumulation de combustible usé. Le recyclage intégral des éléments transuraniens dans les systèmes de réacteurs rapides pourrait augmenter légèrement la quantité de combustible usé et de déchets de haute activité vitrifiés.

Pour la mise en œuvre de cette première étape, l'infrastructure industrielle existante, y compris les usines de fabrication de combustible MOX et de retraitement, sera un facteur de choix décisive. Dans un pays ne possédant pas ce type d'installation, la construction de ces usines coûterait très cher, un inconvénient que l'on pourrait pallier en faisant appel à la collaboration internationale pour mettre en place les installations nécessaires.

La deuxième étape sera une période de transition entre les systèmes à réacteurs à eau ordinaire et les systèmes à réacteurs rapides. Le remplacement des réacteurs à eau ordinaire en fin de vie par des réacteurs rapides commencera lorsque ces derniers pourront faire concurrence aux réacteurs à eau ordinaire. Le rythme d'introduction des réacteurs rapides sera subordonné au rythme d'obsolescence des réacteurs à eau ordinaire et à la disponibilité du plutonium. Tout décideur qui envisage cette étape se doit de garder à l'esprit la nécessité d'adapter la capacité de retraitement du combustible de REO aux quantités de plutonium nécessaires pour alimenter les réacteurs rapides. En outre, le facteur de conversion des réacteurs rapides est un paramètre qui détermine le rythme maximum auquel ce type de réacteur peut être introduit dans le parc. Il convient également à ce stade de régler la question essentielle du recyclage des actinides mineurs contenus dans le stock de combustible usé des REO accumulé au cours du temps. Bien que susceptible de renchérir quelque peu le coût du cycle du combustible, le recyclage des actinides mineurs dans les réacteurs rapides permet de réduire l'impact environnemental des DHA.

La troisième étape consistera à recycler les éléments transuraniens dans les réacteurs rapides et permettra de ce fait d'atteindre les objectifs de la sécurité d'approvisionnement énergétique, d'une exploitation efficace des ressources en combustible nucléaire et de la mise en œuvre de systèmes nucléaires qui soient à la fois écologiques et durables. À ce stade, on aura besoin d'une infrastructure globale, comportant des réacteurs avancés et des usines du cycle du combustible. On pourrait envisager d'installer sur le même site des réacteurs et des usines du cycle du combustible, notamment des usines de retraitement, et recourir à la collaboration internationale pour assurer la sécurité d'approvisionnement en services du cycle du combustible.

3.3.4 Répercussions du recyclage sur les flux de matières et les paramètres du cycle du combustible

Le tableau 3.4 récapitule des valeurs indicatives – tirées d'études nationales et internationales antérieures – des flux de matières et services du cycle du combustible, pour différentes options du cycle.

Tableau 3.4 Flux de matières et services par GWe-an pour des cycles du combustible représentatifs

Cycle du combustible	U naturel (tU)	Enrichissement (MUTS)	Fabrication/retraitement (tML)	DHA (tML)	Stock de matières fissiles (tML/GWe)
REP cycle ouvert	140	0,1	14	14	3,5
REP MOX ¹	120	0,09	14	0,06	4,5
RNR (Pu)	0	0	5,6	0,03	10
RNR (Pu + AM)	0	0	5,6	0,001	10

1. Combustible contenant 90 % d'UOX et 10 % de MOX.

Par ailleurs, le tableau 3.5 montre l'impact – facteur de multiplication par rapport au combustible MOX à teneur initiale en Pu de 12 % – de la présence d'actinides mineurs sur les paramètres physiques importants. Ces résultats sont des données fondamentales tirées des études de faisabilité technique.

Tableau 3.5 Principaux paramètres du cycle du combustible comparés à ceux d'un REO MOX standard

Paramètres	Assemblage RNR (Pu + AM)	Assemblage MIX (Pu + AM)	Cible (Am + Cm)
Source γ α	1,5	3	9
Source de neutrons	30	200	100
Source de chaleur	0,5	3	1,7
Flux annuels (tonnes)	340	820	1,6

3.4 Conclusions

Il existe plusieurs options et technologies pour gérer les matières fissiles et fertiles. Les décideurs peuvent choisir entre le recyclage, l'entreposage de longue durée ou le stockage suivant le contexte socioéconomique global, la politique énergétique et l'infrastructure nucléaire industrielle de leur pays. Étant donné les répercussions à long terme de chacune de ces options, il importe d'intégrer dans une évaluation d'ensemble les facteurs économiques, sociaux et environnementaux pour décider de la solution à adopter. En outre, la mise en œuvre de la solution choisie doit s'appuyer sur une approche responsable et graduelle qui allie perspective à court terme et vision à long terme.

Le stockage fournit une solution définitive, même si la plupart des pays membres de l'OCDE prévoient la possibilité de récupérer un jour les matières stockées. Bien qu'il n'existe pas encore de dépôt de déchets de haute activité civils en service actuellement, de nombreux pays ont aujourd'hui atteint un stade avancé de la conception et de l'aménagement de ces dépôts. Les spécialistes sont d'accord pour dire que le stockage de toutes les matières fissiles et fertiles considérées comme des déchets peut s'effectuer en toute sécurité et garantir leur isolement de la biosphère pendant les périodes jugées nécessaires pour éviter toute répercussion sur l'homme ou l'environnement.

La stratégie de recyclage présente les avantages de réduire les volumes et la radiotoxicité des déchets tout en économisant les ressources naturelles. L'industrie possède d'ores et déjà une expérience substantielle du traitement et du recyclage des matières fissiles et fertiles. Dans certains pays, l'industrie du cycle du combustible gère déjà depuis plus de 20 ans des matières recyclables. D'autres pays s'intéressent de nouveau à la solution du recyclage pour des raisons écologiques et pour préserver la sécurité d'approvisionnement.

Références

Salvatores, M. *et al.*, (1996 et 1997), "Analysis of nuclear power potential at equilibrium", in *Nuclear Science and Engineering*: 124 et 125.

Varaine, F. *et al.*, (2005), "Review on transmutation studies at CEA: scientific feasibility according to neutronic spectrum", in *Proceedings of Global 2005*, Tsukuba, Japon, 9-13 octobre 2005.

Chapitre 4

INDICATEURS POUR L'ÉVALUATION DES SOLUTIONS DE GESTION

4.1 Contexte

Le parc de centrales nucléaires et d'usines du cycle du combustible associées en service dans le monde est la résultante de cinquante années de progrès technologiques jusqu'à ce que le nucléaire atteigne la maturité industrielle et soit devenu une composante à part entière du système électrique. Pour diverses raisons historiques et stratégiques, ces progrès se sont concentrés sur la filière des REO et son cycle du combustible. Bien que ces réacteurs exploitent de manière relativement inefficace l'uranium fissile, leur intérêt tient à leur inventaire faible de matières fissiles par unité de puissance et au fait qu'ils produisent des quantités intéressantes de plutonium utilisable dans les réacteurs avancés du futur.

Aux tout débuts de l'énergie nucléaire, il était peu question de l'aval du cycle du combustible, et la gestion des déchets radioactifs n'était pour ainsi dire pas source d'inquiétude pour les populations. Si l'on a perçu très vite les avantages du recyclage et de la surgénération, l'intérêt pour les réacteurs rapides s'est émoussé à mesure que l'on a découvert de nouvelles ressources en uranium. De nombreux pays ont alors adopté le cycle du combustible ouvert avec entreposage de longue durée du combustible usé dans des installations adaptées avant son stockage définitif. Quelques rares pays, en revanche, ont créé des installations de retraitement et proposé leurs services sur le marché international. Certains pays ont choisi le cycle du combustible fermé qui prévoit le retraitement et le recyclage d'une partie des matières fissiles récupérées, pour l'essentiel le plutonium.

Les usines de retraitement utilisaient une technologie qui consistait à séparer du flux de produits de fission contenant les actinides mineurs l'uranium non utilisé et le plutonium. On a mis au point également un procédé de vitrification de ces déchets qui était compatible avec les impératifs du stockage géologique, car l'objectif ultime était de stocker les DHA dans des dépôts en formations profondes.

Aujourd'hui, d'importantes quantités de combustible usé, des stocks de plutonium séparé et de plus en plus de déchets vitrifiés prêts à être stockés dans des dépôts en formations géologiques après un refroidissement de plusieurs dizaines d'années se trouvent dans divers entrepôts. Faute de dépôt en service pour le combustible usé ou les déchets vitrifiés de haute activité, le stockage définitif de ces matières est une source de préoccupation tant pour les décideurs que pour le public.

Il est de plus en plus admis que le stockage en formation géologique est une méthode appropriée pour stocker de manière sûre les déchets à vie longue qui émettent de la chaleur. Toutefois, les difficultés rencontrées pour trouver des sites, construire et autoriser les dépôts nécessaires face à l'opposition du public ont entraîné des retards dans la mise en œuvre de cette stratégie. Parallèlement, l'entreposage de longue durée des matières contenant des substances radioactives et des radionucléides potentiellement sensibles soulève des problèmes de protection physique et de résistance à la prolifération.

Concernant l'avenir de l'énergie nucléaire, les pays de l'OCDE prennent conscience, bien que l'on soit loin d'un consensus général, qu'il s'agit d'une solution pertinente pour régler les problèmes liés au changement climatique, car l'énergie nucléaire ne produit pratiquement pas de carbone et permet simultanément d'assurer la diversité et la sécurité d'approvisionnement à long terme. Toutefois, pour qu'elle puisse contribuer toujours plus à la satisfaction de la demande d'énergie mondiale, l'énergie nucléaire doit répondre aux préoccupations sociales exprimées par la société civile et partagées par les décideurs.

Dans une perspective de développement durable, les choix technologiques et les solutions dans le domaine de l'énergie nucléaire seront guidés par les principaux critères à long terme qui suivent :

- préserver et utiliser de manière optimale des ressources naturelles telles que l'uranium ;
- réduire au minimum les volumes et la radiotoxicité des déchets de façon à limiter le nombre et les dimensions des dépôts nécessaires ;
- maintenir la sûreté et la fiabilité à des niveaux élevés ;
- régler les problèmes de protection physique et de résistance à la prolifération ;
- être concurrentiel par rapport aux autres options.

Compte tenu de ces objectifs, les responsables des politiques énergétiques devront choisir la voie la plus adaptée pour l'énergie nucléaire en fonction des contraintes que les politiques et pratiques nationales imposent en matière de cycle du combustible.

L'industrie nucléaire travaille à la conception de réacteurs avancés exploitant de manière plus efficace le combustible, dont certains possèdent la capacité de régénérer leur propre combustible, tout en améliorant les propriétés de sûreté intrinsèques de ces installations. Il existe également des concepts d'installations nécessaires à l'exploitation de ces réacteurs en cycle fermé avec un recyclage rapide du combustible. Ces conceptions de réacteurs et d'usines du cycle du combustible sont la résultante de cinquante années de retour d'expérience à échelle industrielle. Elles représentent une amélioration modeste de cette technologie mûre et éprouvée et, dans certains cas, sont la transcription à échelle industrielle de la conception et de l'exploitation de prototypes.

Une série de séminaires organisés par l'AEN a été l'occasion pour les spécialistes de cette discipline de présenter et d'examiner les technologies avancées des réacteurs et cycles du combustible, et les combustibles innovants (voir AEN, 1999 et 2002a). L'AEN, d'autres organisations internationales ainsi que des établissements nationaux ont publié plusieurs études sur les cycles du combustible avancés dont la finalité est d'améliorer la gestion des matières fissiles et fertiles. L'étude sur les systèmes hybrides et les réacteurs rapides (AEN, 2002b), entreprise sous l'égide du NDC, consistait à comparer les caractéristiques de durabilité de ces deux solutions. Cette littérature publiée apporte un éclairage sur les différentes conceptions possibles et leurs avantages relatifs pour ce qui est du respect des principaux critères à long terme énumérés ci-dessus.

Les filières actuelles de REO et les usines du cycle du combustible associées sont en mesure de répondre aux besoins d'électricité à court terme mais n'utilisent pas au mieux les ressources en combustible actuelles sur le long terme. Si l'énergie nucléaire doit conserver sa place dans le parc énergétique, voire jouer un rôle plus important, il convient de prévoir la transition entre les filières actuelles et les filières avancées. Cette transition devra durer plusieurs dizaines d'années et reposera encore longtemps sur l'exploitation d'un parc composite d'installations de conception actuelle et de conception avancée.

Le recyclage du plutonium dans les REO actuels est d'ores et déjà une réalité industrielle dans plusieurs pays européens et le sera d'ici peu au Japon. Les compagnies d'électricité en Allemagne, en Belgique, en France et en Suisse en possèdent l'expérience la plus riche. L'entreprise KKG en Suisse notamment a acquis une solide expérience du recyclage du plutonium et de l'URT de longue date. Le lecteur en trouvera une description plus détaillée à l'annexe D où sont mis en évidence les facteurs à étudier attentivement avant de choisir une stratégie de recyclage. Il apparaît que, à court terme, le recyclage constitue pour une compagnie d'électricité un moyen sûr et économique de s'approvisionner en combustible pour assurer l'alimentation d'une centrale nucléaire une bonne partie de sa durée de vie sans compromettre la possibilité d'un recyclage éventuel dans des réacteurs avancés.

4.2 Sécurité d'approvisionnement

Globalement, la sécurité d'approvisionnement en énergie repose sur une gestion efficace des ressources identifiées. S'il s'agit d'une source d'énergie non renouvelable, un ratio entre les ressources connues, ou réserves, et la demande annuelle, exprimé en années de consommation au rythme actuel, constitue un indicateur de la durabilité de ces ressources. Ces ressources, comme la demande, évoluent au fil du temps avec le progrès technologique, les prix ainsi que de nombreux autres paramètres technico-économiques. C'est pourquoi la durée des ressources non renouvelables ne peut être connue avec certitude. En fait, l'examen des séries chronologiques statistiques concernant le pétrole, le gaz et les ressources en uranium révèle que le nombre d'années de consommation correspondant aux ressources ou réserves connues reste relativement constant dans le temps quels que soient les niveaux de production annuels.

S'agissant du pétrole, le ratio des ressources connues et économiquement viables à la production annuelle actuelle avoisine 40 ; pour le gaz naturel, ce chiffre atteint 65 environ, tandis que, pour le charbon, les réserves suffisent à garantir plus de 150 ans de production au rythme actuel (BP, 2006). Pour les filières de centrales nucléaires exploitées aujourd'hui, les réserves connues suffiront à satisfaire la demande pendant 85 ans au moins au rythme actuel de production, chiffre qui peut être porté à 270 ans si l'on y inclut toutes les ressources classiques (AEN et AIEA, 2006). De ce point de vue, l'énergie nucléaire est en bonne position pour ce qui est de la sécurité d'approvisionnement.

Le recyclage des matières fissiles et fertiles permet cependant de prolonger la durée de vie des ressources connues en uranium récupérables à des coûts raisonnables. Les réacteurs surgénérateurs pourraient multiplier par 50, voire beaucoup plus, la durée des ressources en uranium en fonction du rythme de leur introduction, de leurs facteurs de conversion, de l'efficacité des procédés de recyclage et des pertes lors de ce recyclage.

Par conséquent, le déploiement des réacteurs surgénérateurs rapides avec les installations nécessaires pour le recyclage du combustible permettrait de garantir l'existence de quantités suffisantes de combustible pour produire de l'électricité pendant des millénaires sans émettre de gaz à effet de serre en quantité significative, donc sans produire d'effet négatif sur le climat de la planète.

4.3 Infrastructures et ressources humaines nécessaires

Pendant une bonne partie du 21^e siècle, il va falloir exploiter un parc composé de REO et vraisemblablement de RNR. Les usines de retraitement actuelles (La Hague et THORP, par exemple), conçues pour traiter le combustible usé des REO (UOX, MOX), devraient être techniquement capables de fonctionner jusqu'en 2040. Bien avant cette date, outre la mise en service de l'usine de Rokkasho-Mura, au Japon, plusieurs pays dont les États-Unis et la Chine pourraient avoir besoin de nouvelles

capacités de retraitement. Dans ces usines de retraitement de troisième génération, on séparera simultanément le plutonium et l'uranium contenus dans le combustible usé des petites quantités de déchets proprement dits. Pour améliorer la résistance à la prolifération, on évitera de séparer individuellement le plutonium et l'uranium, comme on le fait aujourd'hui dans les usines de retraitement. Pour assurer la transition entre les systèmes nucléaires actuels et les systèmes plus avancés, il faudra donc construire ces nouvelles usines de retraitement et les exploiter en même temps que celles en service aujourd'hui.

Au-delà de 2040-2050, il sera peut-être souhaitable de recycler le plutonium, l'uranium et aussi les actinides mineurs. Ce sera possible dans les usines de fabrication et de traitement de quatrième génération qui seront conçues pour traiter le combustible usé des REO et des RNR et où la fabrication de combustible frais fera partie intégrante de processus dotés de systèmes de garanties renforcés.

L'étude approfondie des besoins d'infrastructures suppose de prévoir dans une approche cohérente les filières de réacteurs et les usines du cycle du combustible associées. Plusieurs initiatives récentes de l'AIEA (AIEA, 2005), des États-Unis (*Global Nuclear Energy Partnership* – GNEP, www.gnep.energy.gov), de la Russie et d'autres pays, consistent à proposer une coopération à l'échelle mondiale pour la fourniture de services du cycle du combustible. Ces initiatives pourraient mettre en œuvre des installations multinationales exploitées par des consortiums qui fourniraient des services du cycle du combustible aux pays désireux de renoncer à leurs propres usines d'enrichissement et de retraitement.

Outre les besoins d'infrastructures, il apparaît désormais que l'on manque de personnel formé aux disciplines scientifiques et techniques indispensables ou ayant acquis une expérience dans l'industrie nucléaire. Il faudra, par conséquent, mettre en place un programme complet d'enseignement et de formation avant d'envisager d'exploiter l'énergie nucléaire à plus grande échelle dans le monde.

4.4 Aspects sociaux

Dans l'esprit du public, l'énergie nucléaire et les déchets qu'elle produit évoquent, pour quelque temps encore probablement, des images négatives. Il existe déjà des déchets nucléaires, fruit de cinquante années d'exploitation, qui devront être gérés quelle que soit la solution qui sera choisie à l'avenir – recycler le combustible usé ou le stocker directement. Obtenir l'adhésion du public pour la construction d'installations destinées à préparer et/ou à utiliser les matières nucléaires recyclables ne sera pas chose facile.

Il sera primordial de communiquer avec la société civile et de dialoguer avec les diverses parties prenantes afin de faire comprendre au public les solutions qui peuvent être adoptées pour l'aval du cycle du combustible. Pour gagner l'adhésion de la société, la transparence dont feront preuve les pouvoirs publics et les exploitants lorsqu'ils évoqueront les questions nucléaires sera capitale. Diffuser l'information est un préalable, mais obtenir la confiance sera toujours nécessaire si l'on veut être sûr que la société approuve les options qui seront mises en œuvre.

Bien que contribuant à la réduction du nombre d'armes nucléaires, l'exploitation à des fins civiles du plutonium et de l'uranium hautement enrichi démilitarisés pourrait soulever des problèmes éthiques. Pour donner une indication de l'éventail des sensibilités à ce sujet, certains pays exigent des pouvoirs publics l'assurance que les matières fournies par l'industrie nucléaire civile n'ont aucun rapport avec les programmes d'armement. Le problème éthique découle du fait que la société civile peine à accepter l'utilisation dans les centrales nucléaires commerciales de matières provenant de programmes nucléaires militaires auxquels elle est opposée.

En raison des délais prolongés inhérents à la filière de recyclage, il est fort possible que le public adhère plus volontiers à la solution du cycle ouvert avec stockage direct car il est toujours plus facile d'accepter des solutions à court terme. Inévitablement, la gestion des aspects sociaux d'un projet de recyclage qui recouvre plusieurs générations sera nettement plus difficile. La promesse de meilleures perspectives d'emploi pourrait favoriser l'adhésion du public, mais sa participation aux consultations et la mise à sa disposition d'informations impartiales et bien documentées sur les risques associés aux différentes options demeurent les meilleurs moyens de susciter une réaction positive.

Enfin, il reste la question du stockage des déchets radioactifs ultimes qui existent déjà et de ceux qui seront produits à l'avenir. Le stockage des déchets radioactifs dans des installations multinationales est en débat depuis le début des années 70 et revient à l'ordre du jour des décideurs aux plus hauts niveaux. L'économie et l'efficacité de la gestion des ressources plaident assurément pour une collaboration internationale, mais l'éthique plaide en faveur de la solution actuelle où chaque pays assume la responsabilité de ses déchets jusqu'à leur stockage définitif sur le territoire national

La participation de la société civile sera déterminante si l'on veut choisir des options conformes aux préférences nationales qui soient en outre optimales d'un point de vue économique et environnemental. Il faudra communiquer au public les données scientifiques et prévoir le temps nécessaire à une consultation et des débats approfondis avant de pouvoir prendre des décisions rationnelles. Comme pour la formation du personnel, il faut commencer dès aujourd'hui.

4.5 Impact environnemental

L'annexe E contient des informations sur les répercussions environnementales du recours à des combustibles fossiles ou nucléaires pour produire de l'électricité qui peuvent faciliter le débat public. Elle présente une méthode d'évaluation de l'impact environnemental de l'intégralité du cycle du combustible. Un exemple d'application de la méthode au fonctionnement des installations du cycle du combustible indispensables à l'exploitation des centrales nucléaires est également donné. Il est recommandé dans cette annexe de procéder à des évaluations rigoureuses du même type pour les différents cycles des combustibles fossiles pour se faire une image complète et équilibrée de la stratégie énergétique future.

La littérature publiée contient de nombreuses études nationales et internationales du même type. Sur le cycle du combustible nucléaire notamment, un groupe d'experts de l'OCDE a proposé, dans un rapport récent, des critères d'évaluation de la durabilité (AEN, 2002c). Ce rapport contient également des références à d'autres études et à leurs conclusions.

Pour le public, la gestion et le stockage des déchets radioactifs dans des conditions sûres est cruciale. La présence dans les déchets d'isotopes à vie très longue le préoccupe tout particulièrement en raison des répercussions possibles sur les futures générations. Le fait que cette radioactivité décroîtra avec le temps de sorte que ces déchets seront un jour inoffensifs, contrairement à bon nombre de déchets chimiques toxiques dont la toxicité ne diminuera jamais, n'est pas un argument de nature à apaiser vraiment le public.

De ce fait, les cycles du combustible avancés qui ont été mis au point ont pour objectif de traiter une bonne partie des problèmes associés à la radiotoxicité à long terme de ces déchets de haute activité. Dans le cas des DHA produits lors du retraitement du combustible usé, la radiotoxicité à long terme est due à la présence d'actinides mineurs (neptunium, américium, curium, etc.) dans les déchets, l'uranium et le plutonium ayant été récupérés afin de les réutiliser. Quant au combustible usé stocké directement, sa radiotoxicité à long terme est supérieure par ce qu'il contient de surcroît de l'uranium et du plutonium.

D'un point de vue technique, l'un des facteurs déterminants pour la conception d'un dépôt en formation géologique est la chaleur émise par les DHA. Ce ne sont pas les isotopes à vie longue qui contribuent le plus à la production de chaleur mais les produits de fission qui se désintègrent à court et à moyen terme (dans un délai de 100 à 200 ans). Si l'on réduit la quantité d'actinides à stocker, la difficulté technique est moindre, et le problème tel que le perçoit le public est également moindre.

Les cycles du combustible avancés et les réacteurs à neutrons rapides peuvent diminuer la teneur en actinides des déchets de haute activité qu'il faudra finalement stocker dans des dépôts. D'ici là, le mono-recyclage du plutonium sous forme de combustible MOX dans des REO en service aujourd'hui contribue à atténuer la radiotoxicité totale des déchets à vie longue à stocker et prépare l'avènement des réacteurs à neutrons rapides.

Pour surmonter les problèmes posés par la chaleur des déchets, il faudra changer de technologie de retraitement et adopter des techniques de séparation poussée permettant d'éliminer les produits de fission gênants, notamment le césium et le strontium. Ces produits seront entreposés le temps que la décroissance radioactive naturelle des déchets en atténue la charge thermique et facilite les opérations techniques de stockage.

Un large éventail de cycles du combustible avancés sont à l'étude aujourd'hui. Un groupe d'experts de l'OCDE a étudié quelques cycles jugés représentatifs de la multitude des cycles envisagés. Les résultats des évaluations ont été résumés dans une publication récente (AEN, 2006). Les choix stratégiques qui seront faits dépendront des priorités des décideurs et seront notamment déterminés par des critères nationaux spécifiques tels que les caractéristiques des dépôts de déchets disponibles, l'accès du pays à l'uranium et à d'autres ressources en matières fissiles, l'importance du programme électronucléaire national ainsi que des considérations socio-économiques.

Références

BP (2006), *Statistical Review of World Energy*, BP, Londres, Royaume-Uni.

Agence internationale de l'énergie atomique, (2005), *Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle*, AIEA, Vienne, Autriche.

Agence pour l'énergie nucléaire

(2006), *Cycles du combustible nucléaire avancés et gestion des déchets radioactifs*, OCDE, Paris, France.

(1999), *Advanced Reactors with Innovative Fuels – Workshop Proceedings*, Villigen, Suisse, octobre 1998, OCDE, Paris, France.

(2002a), *Advanced Reactors with Innovative Fuels – Workshop Proceedings*, Chester, Royaume-Uni, octobre 2001, OCDE, Paris, France.

(2002b), *Accelerator-driven Systems and Fast Reactors in Advanced Fuel Cycles – A comparative Study*, OCDE, Paris, France.

(2002c), *Le cycle du combustible nucléaire – Aspects économiques, environnementaux et sociaux*, OCDE, Paris, France.

Agence pour l'énergie nucléaire et Agence internationale de l'énergie atomique (2006), *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, France.

Chapitre 5

RÉSULTATS ET CONCLUSIONS

5.1 Principaux résultats

Les matières recyclables disponibles dans le monde entier recouvrent : le combustible usé de diverses filières de réacteurs – en grande majorité du combustible de REO – contenant du plutonium, de l'uranium et des actinides mineurs ; l'uranium appauvri ; l'uranium de retraitement ; le plutonium séparé ; l'uranium hautement enrichi et le thorium. Les stocks de matières recyclables sont importants et estimés représenter au total plus de 2 millions de tonnes.

Pour gérer ces matières fissiles et fertiles recyclables, il existe une vaste panoplie de stratégies à la fois sûres et techniquement et économiquement viables. Il s'agit du stockage direct, de l'entreposage de longue durée et de diverses solutions de recyclage. L'entreposage de longue durée ne constitue pas toutefois une solution à long terme et sera nécessairement suivi du stockage direct ou du recyclage.

Toutes les stratégies de gestion des matières recyclables exigent l'adoption de mesures strictes pour parvenir à des niveaux satisfaisants de sûreté, de protection radiologique, de résistance à la prolifération et de protection physique. Les régimes juridiques et réglementaires en vigueur dans les pays de l'OCDE constituent un cadre solide de ce point de vue. Dans tous ces pays, les stocks de matières fissiles et fertiles recyclables sont gérés conformément à des normes de sûreté et de radioprotection qui garantissent un effet sur l'homme et l'environnement aussi bas que raisonnablement possible.

Il n'existe pas de solution de gestion des matières recyclables qui soit optimale dans tous les cas. La stratégie qui se révélera la meilleure dans un contexte donné dépend d'un grand nombre de facteurs dont la situation spécifique des détenteurs des matériaux, la politique énergétique du pays concerné, l'importance et les caractéristiques du parc nucléaire envisagé pour mettre en place une stratégie de recyclage, l'existence d'un dépôt, l'infrastructure nucléaire industrielle ainsi que le cadre réglementaire national.

Dans plusieurs pays, l'industrie a acquis une expérience significative du recyclage des matières fissiles, pour l'essentiel du plutonium. Bien que l'on n'ait pas encore mis en service de dépôt destiné aux déchets de haute activité, dont le combustible usé, les spécialistes sont d'avis que le stockage de toutes les matières fissiles et fertiles recyclables peut être effectué de manière sûre et fiable. Des programmes de recherche et de développement entrepris dans de nombreux pays visent à améliorer les performances technologiques et économiques et la sûreté des solutions de stockage et de recyclage envisageables pour la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables.

Le stockage de matières recyclables au moment opportun permet d'éviter les coûts et contraintes que représente l'entreposage de longue durée et de s'affranchir des charges financières futures qu'il implique. Toutefois, ce stockage définitif peut interdire d'autres choix ultérieurement s'il n'est pas techniquement ou économiquement possible de reprendre les matériaux stockés. Le recyclage des matières fissiles et fertiles permet d'extraire beaucoup plus d'énergie de l'uranium naturel et du

thorium, de prolonger la durée d'exploitation des ressources en combustible nucléaire et d'améliorer la durabilité de l'énergie nucléaire.

Les techniques actuelles permettent d'exploiter l'énergie contenue dans les matières recyclables jusqu'à un certain point. La quantité d'énergie que l'on peut récupérer, avec ces techniques, dans les stocks d'uranium appauvri est très importante et supérieure à celle que l'on pourrait extraire de l'inventaire de plutonium utilisé dans les systèmes nucléaires de la génération actuelle.

Avec le recyclage, les systèmes énergétiques exploités aujourd'hui pourraient, à partir de la même quantité d'uranium naturel sorti de la mine, produire 50 % de plus d'énergie que les cycles ouverts actuels. Les technologies avancées (réacteurs et cycles du combustible) qui font appel à des réacteurs à neutrons rapides permettraient de multiplier par 50, voire plus, l'énergie produite par unité d'uranium extrait et de réduire d'un même facteur la quantité de combustible usé générée.

5.2 Principales conclusions et recommandations

Les pays et exploitants détenant des stocks de matières fissiles et fertiles recyclables peuvent aujourd'hui choisir entre diverses solutions de gestion viables et sûres. Le choix doit se fonder sur une analyse approfondie des conséquences des différentes options à court et à moyen terme en évitant autant que possible de prendre une décision irréversible qui interdise l'adoption de nouvelles solutions que pourraient offrir de futurs progrès ou percées technologiques.

La quantité d'énergie qu'il serait possible d'extraire en recyclant les matières fissiles et fertiles dépend pour beaucoup de la technologie employée et des stratégies adaptées. Les stratégies les plus efficaces feront probablement appel à des systèmes nucléaires capables d'utiliser diverses matières en synergie (par exemple, du plutonium et de l'uranium appauvri dans des réacteurs à neutrons rapides).

Pour évaluer les solutions de gestion des stocks de matières recyclables, il est essentiel de se placer dans une perspective à long terme qui intègre divers scénarios d'évolution de l'énergie nucléaire dans le système énergétique mondial et les progrès technologiques escomptés.

Au niveau national, les choix des solutions et stratégies doivent être eux-mêmes intégrés aux politiques énergétiques à long terme sachant que certaines options peuvent interdire d'autres choix ultérieurement. Les stocks de matières fissiles et fertiles recyclables représentent une source d'énergie potentielle importante qui pourrait aider les pays dotés de programmes électronucléaires à améliorer leur sécurité d'approvisionnement et à réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur énergétique à des coûts raisonnables.

La gestion des matières fissiles et fertiles recyclables exige une infrastructure et des installations qui risquent fort de ne pas être techniquement et économiquement viables dans tous les pays dotés de centrales nucléaires ou qui envisagent d'en construire. La construction d'installations multinationales régionales et/ou internationales présenterait l'avantage de diversifier l'offre pour tous les pays, y compris ceux qui sont dotés de programmes électronucléaires modestes ou moyens.

Les problèmes clés, tels que la sûreté, la résistance à la prolifération et la protection physique, que soulève la mise en œuvre de stratégies de gestion des matières fissiles et fertiles méritent une réflexion des décideurs et sont susceptibles d'être résolus plus efficacement par la coopération internationale.

Des collaborations internationales portant sur la recherche et le développement, des installations du cycle du combustible et des conventions internationales sur la réglementation faciliteraient la mise en œuvre de solutions optimales au niveau planétaire.

Annexe A

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS

BELGIQUE

Yvon VANDERBORCK Belgonucléaire

RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

Vladislav STARY Ústav jaderného výzkumu Řež a.s

ÉTATS-UNIS

Carter Buzz SAVAGE Department of Energy

FRANCE

Jean CAZALET Commissariat à l'énergie atomique (CEA)
Marc DELPECH Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

JAPON

M. Hirofumi NAKAMURA Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

PAYS-BAS

Jaap HART Nuclear Research and consultancy Group (NRG)

ROYAUME-UNI

Dean GALLACHER Department of Trade and Industry
Paul GILCHRIST (co-président) Nuclear Decommissioning Authority (NDA)

SUÈDE

Ali ETEMAD Vattenfall Fuel Supply

SUISSE

Michel DELANNAY (co-président) Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG

Agence internationale de l'énergie atomique

C. GANGULY Section du cycle du combustible nucléaire et technologie des
déchets, Département de l'énergie nucléaire

OCDE/Agence pour l'énergie nucléaire

Évelyne BERTEL Division du développement de l'énergie nucléaire
David GROOM Consultant (Royaume-Uni)

Annexe B

INVENTAIRE DES MATIÈRES FISSILES ET FERTILES RECYCLABLES

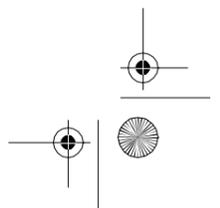
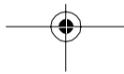
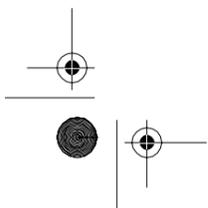
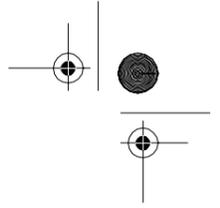
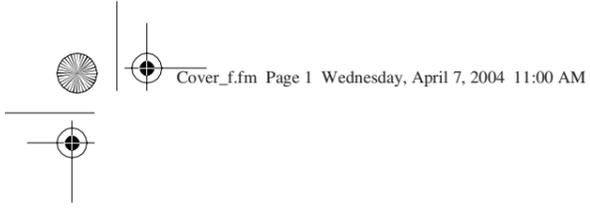
Stocks de matières recyclables à la fin de l'année 2005

Pays	Masse en tonnes									
	Combustible utilisé				URT	Pu	Thorium	UHE	Résidus	Autres
	REO UOX	REO MOX	RNR	Autres						
OCDE Amérique	54 205	0	56	35 557	0	39,30	106	67	739 000	0
Canada*	0	0	0	35 557	0	0,00	0	0	0	0
États-Unis	53 800	0	56	0	na	39,30	106	67	739 000	0
Mexique	405									
OCDE Europe	30 825	535,2	0,1	6 398,7	40 446,2	117,81	33 354,2	1,54	311 696	50,0234
Allemagne	4 160								4 500	
Belgique**	2 344	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0
Espagne	3 370									
Finlande	1 443	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0
France	10 350	520			18 000	48,00	33 300		240 000	
Hongrie	1 094									
Italie	215	15		1,7	14,2	0,01	2,2	0,04		50
Pays-Bas	47					0,00			6 456	0,0234
Rép. slovaque	1 084									
Rép. tchèque	960	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0
Royaume Uni	269	0,2	0,1	6 397	22 432	69,00	52,0	1,5	60 740	
Suède	4 356					0,80				
Suisse**	1 133									
OCDE Pacifique	19 530	0	0	0	348	119,89	2	0	0	0
Corée (Rép. De)	7 960	0	0	0	0	0,00			0	
Japon***	11 570	0			348	119,89	2			
Total OCDE	104 560	535,2	56,4	41 955,95	40 794,2	277,00	33 462,2	68,54	1 050 696	50,0234
Non-OCDE										
Chine										
Inde										
Russie						[2] 78,00		250	545 000	
Ukraine										
Total non-OCDE	[1] 53 000				4 000	78,00		250	545 000	

* Réacteurs à eau lourde sous pression ; ** REO ; *** Cumulées à la fin du mois de septembre 2005.

Les chiffres figurant en italique sont des estimations du Secrétariat.

[1] RBMK + VVER + autres. [2] Y compris 38 t de plutonium "démilitarisé".



Annexe C

SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

À l'heure actuelle l'énergie nucléaire assure 6 % environ de la production mondiale d'énergie primaire. Les évolutions futures de cette technologie dépendront de multiples facteurs, dont des considérations stratégiques qu'il est impossible de prévoir. C'est pourquoi les analystes s'appuient en général sur des scénarios pour étudier les défis et les enjeux de ces diverses évolutions. Dans la présente étude, ces scénarios indicatifs servent de toile de fond aux réflexions concernant l'intérêt d'une gestion attentive des matières fissiles et fertiles recyclables dans une perspective à long terme.

D'ici 2030, les projections établies dans le *World Energy Outlook* (AIE, 2006) donnent une valeur de la puissance nucléaire installée dans le monde variant de 415 à 520 GWe, ce qui correspond à un pourcentage de l'énergie nucléaire dans la production d'électricité situé entre 10 % et près de 14 %. Sachant qu'en 2004 l'énergie nucléaire représente 16 % de la production mondiale, ces scénarios, qui paraissent réalistes, ne prévoient pas un essor important du secteur nucléaire et donc ne devraient pas faire redouter des difficultés d'approvisionnement en combustible quelle que soit l'option adoptée pour la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables. Notons toutefois que ces scénarios ne sont pas compatibles avec les objectifs de sécurité d'approvisionnement et de protection de l'environnement que la plupart des pays de l'OCDE se sont fixés car, malgré une pénétration significative des sources d'énergie renouvelables sur les marchés, ils prévoient une dépendance encore accrue vis-à-vis des combustibles fossiles importés.

À plus long terme, les projections de l'évolution de l'énergie nucléaire révèlent que la puissance installée nucléaire pourrait se situer en 2050 entre 350 et 1 800 GWe (voir figure AC.1 tirée de l'étude de l'IIASA/WEC), bien que, dans des projections plus récentes, l'intervalle se soit rétréci entre 700 et 1 200 GWe. À l'évidence, des facteurs comme le rythme de croissance des prix des combustibles fossiles et les progrès de la technologie nucléaire auront un impact notable sur la nature des parcs énergétiques. En particulier, l'avènement de l'économie de l'hydrogène et des réacteurs à très haute température pourrait ouvrir à l'énergie nucléaire des marchés autres que celui de l'électricité.

Les scénarios à l'horizon 2100 sont extrêmement hypothétiques car, en un siècle, tant les schémas de production et de consommation que l'état de développement technologique d'énergies telles que l'énergie photovoltaïque et la fusion thermonucléaire peuvent changer considérablement. C'est pourquoi des études prospectives à des horizons aussi lointains sont principalement destinées à faciliter l'analyse des problèmes soulevés par différents futurs possibles, contrastées.

La figure AC.2 s'inspire du rapport du GIEC sur les scénarios d'émissions (GIEC, 1998) qui contient un ensemble complet de scénarios de la demande et de l'offre d'énergie avec les émissions correspondantes de gaz à effet de serre jusqu'en 2100, tirés d'une compilation des résultats fournis par des modèles de pointe. Les scénarios sélectionnés à titre illustratif sur la figure recouvrent un large éventail de possibles, depuis la mise en œuvre de politiques d'inspiration écologique (scénario C) jusqu'à des solutions guidées par le progrès économique et technologique (scénario A) en passant par

un scénario d'évolution tendancielle (scénario B). Les projections de la production d'électricité nucléaire obtenues ainsi pourraient varier d'un facteur 5 d'ici 2100.

Figure AC.1 Scénarios indicatifs de la puissance électronucléaire mondiale (GWe) d'ici 2050

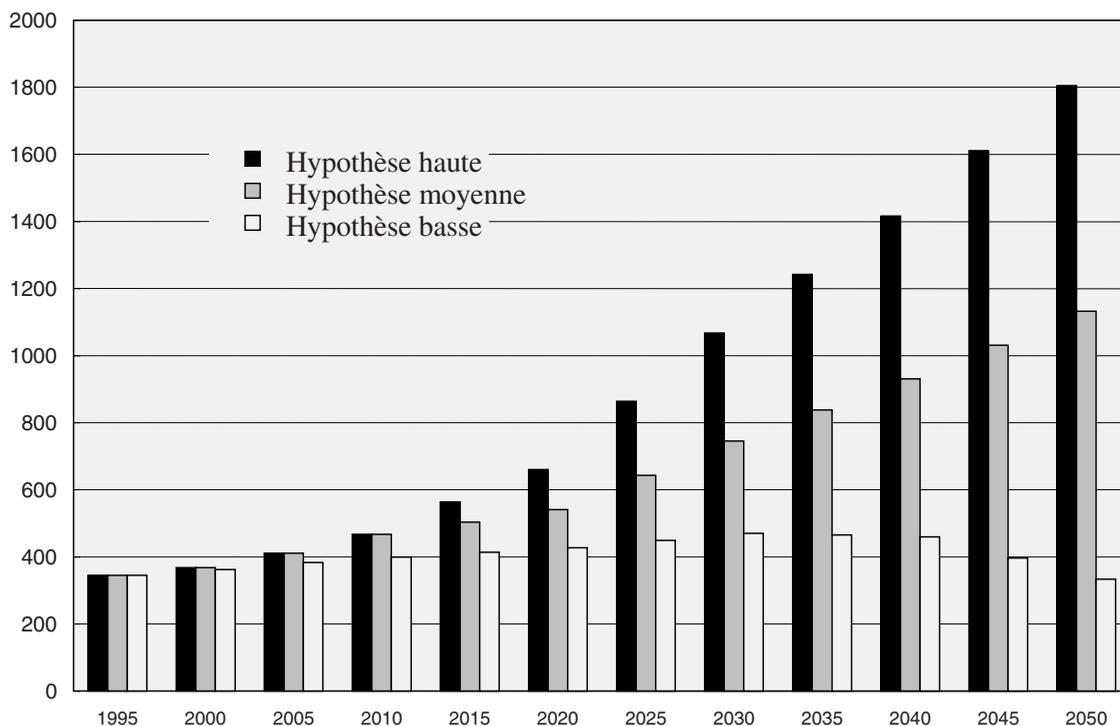
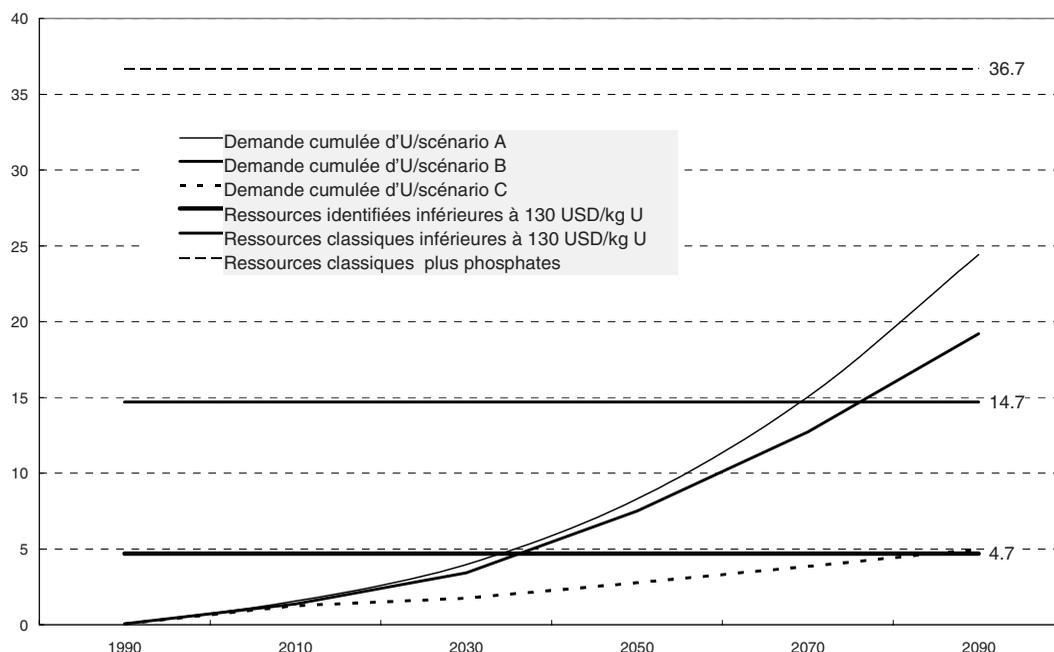


Figure AC.2 Scénarios de la consommation d'uranium cumulée et catégories de ressources (millions tU)



Les consommations cumulées d'uranium ont été estimées pour un parc de réacteurs possédant des caractéristiques proches de la génération actuelle des centrales nucléaires, c'est-à-dire consommant environ 170 tU/an par GWe. À l'évidence, des améliorations du fonctionnement des systèmes nucléaires permettraient d'abaisser progressivement la consommation moyenne d'uranium par unité d'électricité produite. Toutefois, cette démarche prudente permet d'illustrer les problèmes auxquels pourrait se heurter la croissance de la production électronucléaire à l'horizon 2030 et au-delà. Les niveaux des ressources en uranium sont tirés de la dernière édition du Livre rouge (AIEA, 2006).

Dans tous les scénarios, on note une forte augmentation de la consommation cumulée d'uranium d'ici 2040 et, dans les scénarios A et B, la demande cumulée atteint avant 2040 le niveau des ressources identifiées aujourd'hui. Sachant que la consommation cumulée d'uranium ne tient pas compte de la demande « engagée », c'est-à-dire correspondant aux quantités nécessaires pour alimenter les centrales nucléaires en service sur toute leur durée de vie, c'est-à-dire autour de 60 ans, l'intérêt d'évaluer la valeur des matières recyclables est évident. L'analyse doit être effectuée compte tenu de l'épuisement progressif des ressources en uranium actuellement connues, de l'évolution prévue des prix de l'uranium et de la découverte potentielle de ressources supplémentaires.

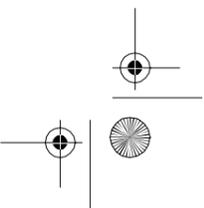
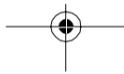
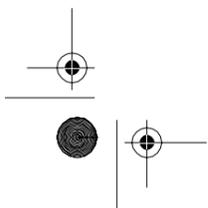
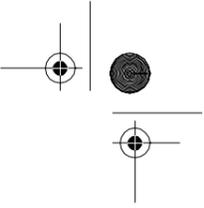
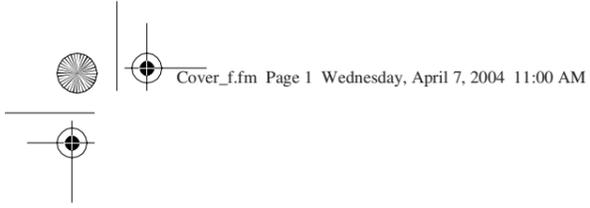
Références

Agence internationale de l'énergie (2006), *World Energy Outlook 2006*, AIE, Paris, France.

Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués/Conseil mondial de l'énergie (1995), *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, IIASA, Autriche.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (1998), *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, GIEC, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

Agence pour l'énergie nucléaire et Agence internationale de l'énergie atomique (2006), *Uranium 2005 : ressources et production et demande*, OCDE, Paris, France.



Annexe D

RECYCLAGE DU PLUTONIUM ET DE L'URANIUM DE RETRAITEMENT DANS UN REP : L'EXPÉRIENCE D'UNE COMPAGNIE D'ÉLECTRICITÉ

Le recyclage de l'uranium de retraitement (URT) et du plutonium (Pu) que renferme le combustible usé permettrait d'économiser de 10 à 20 % des ressources d'uranium naturel. Il est techniquement et économiquement réalisable dans les REO exploités aujourd'hui. Il a été mis en œuvre à échelle industrielle dans plusieurs pays (Allemagne, Belgique, France et Suisse).

De l'expérience du producteur d'électricité KKG, en Suisse, on retiendra qu'il importe de tenir compte des aspects décrits ci-dessous.

Recyclage des stocks existants de plutonium

Le plutonium extrait lors du retraitement du combustible usé de REO dans les installations de La Hague (France) et de Sellafield (Royaume-Uni) est entreposé sur le site de l'usine de retraitement avant son transfert à destination des usines de MOX situées en France, en Belgique, au Japon et au Royaume-Uni.

Sous la forme de PuO_2 , le plutonium est un produit très stable qui peut être entreposé si nécessaire sur de longues périodes de temps. Les coûts de l'entreposage sont toutefois très élevés, à cause de la radioactivité des matières entreposées, mais aussi pour des raisons de sécurité.

Une fois en possession de la quantité de plutonium qui lui revient, l'entreprise d'électricité a intérêt à le recycler sous forme d'assemblages MOX dans les plus brefs délais non seulement pour éviter les coûts élevés de son entreposage, mais parce que sa qualité isotopique se dégrade avec le temps.

Les principaux isotopes présents dans le plutonium ainsi récupéré sont le ^{238}Pu , le ^{239}Pu , le ^{240}Pu , le ^{241}Pu et le ^{242}Pu . Leur concentration relative dépend des caractéristiques techniques du combustible usé dont ils proviennent et du temps qui s'est écoulé avant le retraitement puis, après ce retraitement, de la durée de l'entreposage. Dans un REO, les isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu sont fissiles, et leur concentration détermine la réactivité de l'assemblage MOX lorsqu'il est inséré dans le cœur du réacteur.

Le ^{241}Pu se désintègre assez rapidement (période de 14,4 ans) pour donner de l' ^{241}Am . Si l'on entrepose longtemps le plutonium ainsi séparé avant de l'expédier chez un fabricant de MOX, il perd de sa valeur fissile dans le réacteur et, par voie de conséquence, de son énergie. En outre, l' ^{241}Am émet un rayonnement pénétrant qui impose de prendre des mesures pour protéger les travailleurs de l'usine de fabrication de combustible MOX. C'est pourquoi les fabricants de MOX ont imposé un seuil maximum pour la concentration en ^{241}Am de façon à limiter la dose de rayonnement à laquelle pourraient être exposés les travailleurs. Dans certaines usines, ce seuil pourrait être dépassé après 5 ou

6 années d'entreposage du plutonium séparé. Pour les usines les plus récentes, ce seuil a été relevé, et le plutonium après 10 ans d'entreposage possède toujours des propriétés acceptables.

Tous ces facteurs exigent des compagnies d'électricité une extrême vigilance de façon à bien synchroniser le moment de la fabrication du combustible MOX avec celui du retraitement du combustible usé. Il importe également d'ajuster le rythme du retraitement aux quantités de plutonium qui pourraient effectivement être recyclées dans les réacteurs de façon à éviter l'accumulation de stocks de plutonium et leur vieillissement.

Si, pour des raisons politiques, techniques ou administratives, le plutonium séparé doit être entreposé sur de longues périodes, il est techniquement possible de le traiter avant son recyclage afin d'en extraire l'²⁴¹Am. Cette opération peut avoir lieu dans l'usine de retraitement. Elle est toutefois très onéreuse (il s'agit essentiellement d'une opération de retraitement supplémentaire) et doit être effectuée juste avant l'envoi du plutonium à l'usine de fabrication du combustible MOX.

Les cœurs de REO des filières actuelles peuvent recevoir jusqu'à un tiers d'assemblages MOX, ce qui permet à la compagnie d'électricité de réaliser d'importantes économies sur l'achat et l'enrichissement de l'uranium. Toutefois, ces économies peuvent être neutralisées par le coût plus élevé de la fabrication du combustible MOX et les frais de transport.

D'après l'Agence d'approvisionnement d'Euratom, à la fin de l'année 2005, près de 86 tonnes de Pu avaient été utilisées pour fabriquer du combustible MOX et chargées dans les REO exploités dans les pays de l'Union européenne. Partant des hypothèses très prudentes selon lesquelles une tonne de Pu dans le combustible MOX équivaut à 120 tU et 80 tUTS, les économies réalisées grâce à ce recyclage sont évaluées par cette agence à plus de 10 000 tU et près de 7 000 tUTS.

Toutefois, l'utilisation d'assemblages MOX présente également des inconvénients que l'on peut résumer de la manière suivante :

- Par rapport à un assemblage combustible à l'uranium, les coûts de fabrication d'un assemblage MOX et de son transport sur le site du réacteur sont actuellement beaucoup plus élevés.
- Un assemblage MOX, lorsqu'il est usé, produit nettement plus de chaleur qu'un assemblage de combustible usé à l'uranium, ce qui pourrait renchérir l'entreposage ultérieur.
- Bien qu'il soit techniquement possible d'envoyer les assemblages MOX usés dans une usine de retraitement, la détérioration de la qualité du plutonium rend inintéressant un second recyclage dans les REO. Une solution consisterait à retraiter ces assemblages MOX en même temps que les assemblages à l'uranium (dans un rapport de 1 à 10) pour obtenir une qualité moyenne du plutonium qui soit compatible avec un nouveau recyclage dans les filières actuelles de REO. En outre, comme l'on utilise d'ordinaire de l'uranium appauvri dans la matrice d'U/Pu du combustible MOX, l'enrichissement résiduel de l'uranium de retraitement (URT) que l'on pourrait récupérer lors d'un deuxième retraitement est extrêmement faible et rendrait très difficile un ré-enrichissement même si l'on prévoit un mélange avec d'autre URT.
- Il convient de ne pas insérer dans le cœur des assemblages au combustible MOX lorsque l'on approche de la fin de la durée de vie du réacteur. Étant donné qu'ils produisent nettement plus de chaleur, les assemblages combustibles MOX usés doivent être refroidis au moins dix ans avant de pouvoir être transférés de la piscine du réacteur dans des conteneurs à sec en vue d'un entreposage de longue durée. Pour éviter des coûts d'exploitation élevés après la fermeture définitive du réacteur, il convient donc de vider la piscine de désactivation le plus

vite possible. Transporter le combustible MOX usé à l'extérieur du site en vue de son retraitement ou d'un entreposage de longue durée en piscine permettrait de surmonter cette difficulté.

Bien que les coûts du recyclage du plutonium sous forme d'assemblages MOX augmentent les coûts de la production d'électricité par rapport à l'utilisation d'uranium, ce choix n'est qu'un élément d'une stratégie globale du cycle du combustible. L'analyse approfondie de tous les coûts du cycle du combustible (amont, aval et stockage définitif) est seule capable de révéler les avantages et inconvénients du cycle fermé par rapport au cycle ouvert. Il convient en outre de tenir compte de la disponibilité d'URT pour le recyclage.

À l'heure actuelle, le recyclage du plutonium sous forme d'assemblages MOX est la seule solution réaliste pour une compagnie d'électricité qui a choisi le cycle du combustible fermé. Ce recyclage permet non seulement de gérer de manière sûre et avantageuse le plutonium récupéré lors du retraitement, qui est ainsi à l'abri de tout détournement possible, mais d'économiser les ressources en uranium mondiales. Le recyclage du plutonium sous forme de combustible MOX dans les REO est un procédé industriel éprouvé qui ne présente pour le fonctionnement du réacteur ni problème technique, ni problème de sûreté. Sur cette base, pour épargner davantage les ressources en uranium, on pourrait concevoir que les compagnies d'électricité sans programme de recyclage échangent leur plutonium avec les entreprises qui désirent recycler et sont capables de le faire.

Bien que non technique, un facteur pourrait dissuader les compagnies d'électricité de recycler systématiquement le plutonium appartenant à des tiers. Un assemblage combustible MOX qui contiendrait du plutonium de tiers ne permettrait pas de réduire le nombre d'assemblages combustibles irradiés à stocker (il faut retraiter 7 assemblages combustibles de REP pour produire la quantité de plutonium nécessaire à un assemblage combustible MOX). Cet assemblage ne fait que remplacer un assemblage à l'uranium pour produire de l'énergie, et il présente tous les inconvénients techniques et financiers spécifiques à un assemblage MOX sans les avantages apportés par le retraitement.

La mise en œuvre d'une stratégie permettant d'utiliser à court terme le plutonium appartenant à des tiers exigerait la création d'un marché qui devrait offrir aux entreprises utilisatrices des solutions techniques et financières adaptées et attrayantes pour la gestion ultérieure des assemblages combustibles MOX usés.

Il est à noter que les assemblages MOX usés sortant des REO contiennent des quantités précieuses de matières fissiles qui pourraient être exploitées avec beaucoup de profit dans des systèmes à réacteurs rapides.

Le recyclage des stocks actuels d'uranium de retraitement (URT)

Après le retraitement, l'URT se trouve sous une forme liquide (UHN) et doit alors être converti sous une forme solide, en UO_3 ou U_3O_8 , ou sous forme gazeuse, en UF_6 , suivant le moment où intervient son recyclage.

Les formes physiques UO_3 et U_3O_8 sont très stables et donc adaptées à un entreposage de longue durée. Ce sont les formes physiques qui conviennent aux compagnies d'électricité qui n'ont pas de projet immédiat de recyclage de l'URT. Cette matière peut être facilement entreposée dans des fûts industriels sur de longues périodes en attendant que soient réunies des conditions techniques ou commerciales propices à la réutilisation ou au recyclage de ces matières.

Si l'on envisage un recyclage à court terme, l'URT doit être réenrichi. Dans ce cas, l'URT peut être reçu sous forme solide avant d'être mélangé avec de l'UHE ou sous forme d'UF₆ qui sera ensuite enrichi par les procédés classiques.

Sous sa forme oxyde, l'URT peut être facilement transporté dans des conteneurs du commerce. La forme UF₆ est également un produit stable, néanmoins plus susceptible de s'oxyder. Le produit est entreposé dans des conteneurs standards 30B. Comme ces conteneurs doivent faire l'objet d'une maintenance régulière, cette forme physique n'est pas intéressante si l'URT doit être entreposé longtemps avant son recyclage.

Après passage en réacteur, on trouve dans l'URT des isotopes de l'uranium, dont ²³²U et ²³⁶U, en plus des trois isotopes – ²³⁴U, ²³⁵U et ²³⁸U – qui existent déjà dans l'uranium naturel. La concentration relative de ces isotopes de l'uranium dépend, entre autres, du type de combustible, de son enrichissement initial en ²³⁵U, du taux de combustion atteint au déchargement et du temps de refroidissement du combustible utilisé.

L'²³⁶U est un absorbant neutronique. Pour compenser la présence de cet isotope il faudra donc surenrichir le combustible en ²³⁵U si l'on souhaite recycler l'URT dans des assemblages combustibles nucléaires de réacteurs commerciaux. Dans les centrifugeuses, les isotopes plus légers que l'²³⁵U s'enrichissent davantage que l'²³⁵U. La concentration relative de l'absorbant neutronique ²³⁴U s'accroît par conséquent, ce qui, associé à la présence d'²³⁶U, exige d'augmenter la quantité d'²³⁵U pour obtenir une réactivité équivalente dans le cœur du réacteur. Il s'agit d'un phénomène à prendre en compte dans la conception du schéma de chargement du réacteur, car il pourrait nuire à la souplesse des stratégies de gestion du combustible en cœur.

L'²³²U n'a quasiment aucune influence sur la réactivité des assemblages combustibles, mais pourrait avoir néanmoins des conséquences radiologiques majeures pour les opérations ultérieures de ré-enrichissement et de fabrication. Bien qu'il soit présent en très faible quantité (parties par million), certains de ses produits de filiation émettent un rayonnement pénétrant. Dès la fin des opérations de retraitement, la concentration de ces produits de filiation augmente régulièrement et le rayonnement émis finit par être si fort qu'il nécessite des protections supplémentaires dans les usines de recyclage de l'URT. Il s'agit là de l'une des préoccupations premières des fabricants de combustible.

En raison de l'impact radiologique de l'²³²U que contient l'URT, ce dernier, une fois enrichi sous forme d'UF₆, doit être converti en poudre d'UO₂ dans un délai de deux mois. Comme elles n'ont pas été conçues spécialement pour la fabrication d'assemblages combustibles à l'URT, la plupart des usines de combustible commerciales imposent des seuils très stricts pour la concentration d'²³²U de façon à maintenir à un niveau acceptable la dose de rayonnement reçue par les travailleurs.

La succession dans le temps de tous les procédés de recyclage de l'URT doit être minutieusement planifiée. La marge de manœuvre pour faire face à des événements extérieurs susceptibles de créer des retards significatifs est extrêmement étroite. Toutefois, si l'on dépasse la concentration maximale d'²³²U, il est toujours possible de transvaser l'URT dans un autre fût et de filtrer les matières qu'il contient pour réduire la concentration des produits de filiation de l'²³²U, mais cette opération augmente les coûts et provoque des retards. C'est une technique que l'on peut également appliquer à l'UF₆ qui a été entreposé longtemps avant enrichissement.

La gestion des rejets du ré-enrichissement de l'URT par centrifugation devra intégrer la nécessité d'adopter des mesures de protection radiologique renforcées, qui coûteront très cher, par rapport à la gestion des rejets de l'enrichissement de l'uranium naturel. Néanmoins, ces matières ne doivent pas être considérées comme des déchets nucléaires. Au contraire, elles peuvent être entreposées dans des

conditions sûres jusqu'à ce qu'elles puissent être recyclées à échelle industrielle dans la nouvelle génération de réacteurs nucléaires.

Pour éviter les inconvénients des technologies d'enrichissement actuelles, l'enrichissement de l'URT peut être effectué en le mélangeant avec de l'uranium plus enrichi en ^{235}U , c'est-à-dire de l'UME (qui contient environ 36 % d' ^{235}U) ou de l'UHE (plus de 90 % d' ^{235}U).

L'intérêt de procéder à ce mélange tient au fait que toutes les quantités traitées sont immédiatement disponibles pour être recyclées. Toutes les contraintes liées aux rejets disparaissent. En outre, la fraction d'isotopes qui sont des absorbants neutroniques est moindre et l'on a, par conséquent, moins besoin de surenrichir en ^{235}U pour compenser ces isotopes. La concentration en ^{232}U est également moins forte et les répercussions radiologiques de ses produits de filiation sont réduites. La fabrication et le transport des assemblages combustibles à l'URT se déroulent exactement de la même manière que pour les assemblages à l'uranium naturel.

Depuis la fin des années 90, la Russie a offert ses services pour effectuer les mélanges à échelle commerciale, et les compagnies d'électricité européennes (allemandes, néerlandaises et suisses) ont recyclé nettement plus d'URT dans leurs REO. Outre ses avantages techniques, le recyclage de l'URT présente des qualités commerciales suffisamment attrayantes par rapport à l'utilisation d'uranium naturel pour stimuler la demande. L'augmentation constante des prix de l'uranium depuis 2004 a contribué à la hausse de cette demande.

Pour les compagnies d'électricité qui cherchent la première occasion intéressante de recycler leurs stocks, l'URT est un atout précieux. Il pourrait à court terme contribuer, pour une part substantielle, à la sécurité d'approvisionnement et aux économies sur les ressources naturelles en attendant le déploiement d'une nouvelle génération de réacteurs nucléaires. Une structure industrielle est déjà en place et il n'y a pas d'obstacle technique important au recyclage de l'URT dans les REO existants. La principale raison de le faire est son intérêt économique. En outre, cette option ne soulève pas d'opposition notable d'organisations politiques ou environnementales.

Dans les REP actuels, les rechargements annuels peuvent être constitués de 100 % d'assemblages à l'URT, entraînant pour les compagnies d'électricité des économies substantielles sur les achats d'uranium. Certaines compagnies suisses ont des contrats d'achat à long terme d'assemblages à l'URT qui leur permettront de satisfaire leurs besoins jusqu'aux alentours de 2020. Si ces entreprises recyclent, en outre, leurs stocks de plutonium dans des assemblages MOX, elles n'utiliseront plus, pendant longtemps, que des matières recyclables dans leurs réacteurs. Elles n'auront donc plus besoin d'acheter de l'uranium naturel à un moment où le prix subit une hausse significative en termes réels.

On estime qu'à la fin de 2005, le recyclage de l'URT dans les réacteurs des pays européens a permis de consommer environ 3 000 tonnes d'uranium naturel en moins. Ce recyclage est le fait pour plus d'un tiers de compagnies d'électricité suisses.

Stocks actuels de combustible usé

Tant que les assemblages combustibles usés ne sont pas placés dans des colis et stockés (sans intention de les récupérer), ils constituent un stock de matières éventuellement recyclables que l'on peut récupérer grâce au retraitement.

La décision de retraiter le combustible usé dépend de plusieurs facteurs. En effet, l'intérêt de recourir au cycle fermé plutôt qu'au cycle ouvert peut évoluer avec les années en fonction de la

situation économique et industrielle. En outre, le contexte politique peut imposer un moratoire ou une interdiction de retraiter voire de transporter les combustibles usés.

Les assemblages combustibles usés qui ne sont pas retraités sont entreposés sur divers sites en attendant leur stockage définitif ou de meilleures conditions pour un retraitement ultérieur. L'entreposage peut être effectué :

- dans des piscines de désactivation installées sur les sites de réacteurs ou dans des centres d'entreposage (par exemple, le CLAB, en Suède, ou Tihange, en Belgique) ;
- à sec, dans des conteneurs servant à la fois au transport et à l'entreposage sur les sites de réacteurs (compagnies d'électricité allemandes, Doel, en Belgique) ou dans un entrepôt central (par exemple, Gorleben, en Allemagne, ou ZWILAG, en Suisse).

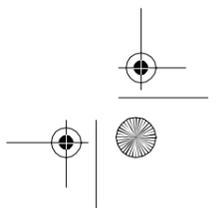
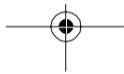
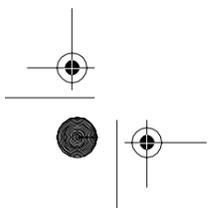
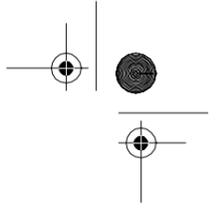
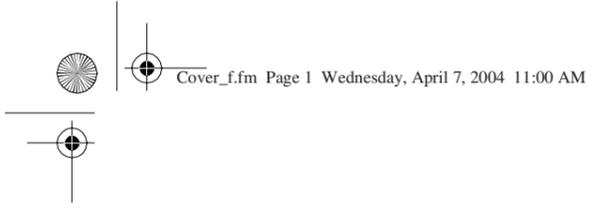
Les assemblages combustibles usés entreposés dans le monde représentent une source considérable de combustible nucléaire précieux pour la prochaine génération de réacteurs qui pourraient donner le jour à un système énergétique durable à l'échelle planétaire. En outre, le stock actuel qui avoisine pour le monde entier 10 000 tonnes de combustible usé augmente chaque année.

Tout ce combustible usé doit être entreposé sur une longue période avant de pouvoir éventuellement être recyclé. Lorsque l'on étudie la meilleure manière d'entreposer ce combustible, il convient d'analyser les aspects suivants :

- Ce combustible usé devra être transporté jusqu'aux usines de retraitement. Tous les règlements relatifs au transport en vigueur au moment où interviendra l'opération elle-même devront être respectés. On a aujourd'hui peu d'expérience du comportement mécanique de combustible usé qui aurait été entreposé pendant plusieurs décennies, en particulier à sec. Pour garantir la sûreté de ces transports, des études et recherches sont nécessaires afin d'évaluer le comportement de ces assemblages combustibles anciens dans des conditions de transport normales et accidentelles.
- Pour ce qui est des conteneurs d'entreposage à sec, bien qu'ils aient obtenu les agréments nécessaires pour le transport au moment de leur chargement, ce ne sera probablement pas le cas lorsqu'ils devront être transportés afin de retraiter le combustible usé. Les assemblages combustibles devront alors être transférés dans des châteaux de transport adaptés d'un modèle récent. Ces opérations devront être effectuées dans des cellules chaudes qui, pour l'instant, n'existent pas sur tous les sites d'entreposage. Dans le cas des conteneurs d'entreposage à sec qui se trouvent sur les sites de réacteurs, cette opération pourrait avoir lieu dans la piscine de désactivation du réacteur. Toutefois, après une période prolongée d'entreposage, rien ne garantit que le réacteur sera toujours en service et que l'on disposera encore des moyens nécessaires à la manutention du combustible.
- Comme les matières fissiles récupérées ne seront sans doute pas réutilisées dans les réacteurs d'où provient le combustible usé, seules les compagnies d'électricité ayant un ambitieux programme de réacteurs sur de longues années pourront effectuer la planification à long terme nécessaire.
- Les entreprises d'électricité qui, pour diverses raisons, industrielles, économiques ou politiques, n'envisagent pas de remplacer les réacteurs qu'elles possèdent lorsqu'ils auront atteint la fin de leur durée de vie, préféreront normalement s'acquitter le plus vite possible de leurs obligations concernant le stockage définitif de leur combustible usé. Le transfert du combustible usé à une autre entreprise, et notamment à l'étranger, pourrait poser des problèmes politiques difficiles. Le coût de l'entreposage du combustible usé dans l'attente d'une reprise incertaine d'un programme nucléaire national serait prohibitif et pourrait se

heurter à l'opposition farouche d'organisations politiques et environnementales. En outre, la reprise du combustible usé qui aurait été stocké dans des dépôts en formation géologique, qu'ils aient été ou non conçus à cet effet, serait à la fois un véritable défi technique et extrêmement onéreuse.

Bien que le combustible usé des REO de la génération actuelle représente une énorme source de matières nucléaires susceptibles d'alimenter la prochaine génération de réacteurs, rares sont les pays qui ont actuellement mis en place des stratégies à long terme qui justifieraient un entreposage de longue durée. De nombreuses compagnies d'électricité de par le monde ont choisi de stocker directement leur combustible usé dans des dépôts en formations géologiques. Une fois que ces dépôts seront en service, le contenu fissile éventuellement récupérable du combustible usé risque d'être définitivement perdu.



Annexe E

RÉPERCUSSIONS ENVIRONNEMENTALES ET SANITAIRES DES INSTALLATIONS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

Introduction

Quelle que soit l'énergie primaire utilisée, la production d'électricité a un effet sur l'environnement. Pour effectuer une étude fiable de l'impact sur l'environnement des diverses filières énergétiques, il importe que les spécialistes qui travaillent sur d'autres filières possèdent des connaissances générales sur toutes les composantes du cycle du combustible nucléaire. La présente annexe contient une description générique des rejets dans l'environnement du cycle du combustible nucléaire et de leurs effets sur la santé des travailleurs du secteur. Conformément à cette démarche globale, seuls les rejets des installations nucléaires sont évoqués car leurs effets sont jugés dépendre fortement du site ou du pays où les installations sont situées. Par exemple, la définition de l'environnement peut varier d'un pays à l'autre de même que paramètres employés pour définir les impacts.

Dans une étude comparative des différentes filières énergétiques, il importe d'étudier les répercussions de toutes les composantes du cycle du combustible. Il s'agit normalement de l'extraction des matières premières, du transport des produits intermédiaires et des déchets, du traitement des matières, de l'entreposage du combustible usé ou de son retraitement ainsi que de la gestion des déchets produits à toutes les étapes de la filière. Il faut alors évaluer les effets sanitaires et environnementaux potentiels des rejets, radioactifs ou non, sur les travailleurs, le public et l'environnement dans les conditions normales d'exploitation.

La présente annexe donne un aperçu des principaux contaminants que l'on trouve dans les flux de déchets et effluents des installations nucléaires et de leurs répercussions.

À la mine d'uranium, les procédures d'exploitation courantes garantissent normalement une pollution de l'air ou de l'eau insignifiante. Les effets environnementaux de l'extraction du charbon aujourd'hui sont également faibles, à ceci près qu'il faut ultérieurement réaménager des gisements plus importants et que, dans certains secteurs, le drainage acide minier peut poser un problème.

Tant les centrales au charbon que les centrales nucléaires émettent dans l'environnement de petites quantités de radioactivité. Au cours de la combustion du charbon, les cendres volantes qui contiennent de l'uranium, du radium et du thorium sont radioactives, et cette radioactivité peut varier considérablement. Les centrales nucléaires et les usines de retraitement rejettent de petites quantités de gaz radioactifs. À l'heure actuelle, elles ne présentent ni l'une ni l'autre un problème environnemental significatif.

Les déchets solides de haute activité que produisent les centrales nucléaires sont entreposés de 40 à 50 ans, le temps que cette radioactivité décroisse à moins de 1 % de son niveau d'origine. Ils seront finalement stockés dans des lieux bien isolés de la biosphère. Les déchets de moyenne activité sont installés dans des dépôts souterrains, et les déchets de faible activité sont en général enfouis de

manière plus classique. Les cendres volantes radioactives des centrales au charbon avaient jadis un impact sur l'environnement nettement supérieur, surtout parce qu'elles n'étaient pas ressenties comme un problème et que l'on ne prenait pas les mesures nécessaires pour en éviter la dispersion. Aujourd'hui, en revanche, les cendres sont enfouies dans des bassins dont tous les suintements et écoulements doivent être maîtrisés.

La chaleur résiduelle résultant de l'inefficacité intrinsèque de la conversion de l'énergie et qui peut donc être considérée comme un sous-produit de la production d'électricité est pratiquement identique, que le combustible primaire soit du charbon ou de l'uranium. Le rendement thermique des centrales à charbon varie de 20 % à 40 % environ, les installations les plus récentes dépassant 32 %. Celui des centrales nucléaires s'échelonne le plus souvent entre 29 et 38 %, sachant que le modèle courant de réacteur à eau ordinaire affiche aujourd'hui un rendement proche de 34 %. Il n'y a pas de raison de préférer un combustible plutôt que l'autre si l'on se fonde seulement sur la chaleur résiduelle. C'est le cas que l'on refroidisse la centrale à l'aide de l'eau d'un cours d'eau ou d'un estuaire ou en utilisant des réfrigérants atmosphériques. En tout état de cause, cette chaleur n'est pas toujours considérée comme un déchet. De plus en plus, elle est employée pour le chauffage urbain ou pour des usages agricoles.

Les principales nuisances environnementales associées à la production d'électricité sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le dioxyde de soufre (SO₂) que produisent les centrales au charbon (Hore-Lacy, 2003). La combustion d'autres combustibles fossiles, tels que le pétrole et le gaz, produit également du CO₂.

Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote rejetés dans l'atmosphère en grandes quantités peuvent provoquer des pluies acides et du smog. Les centrales électriques de l'hémisphère nord rejettent des millions et des millions de tonnes de SO₂ chaque année. La plupart de ce SO₂ peut être éliminé des gaz rejetés à la cheminée, mais à un coût considérable. En revanche, entre 1980 et 1986, la France a divisé par deux ses émissions de SO₂ en remplaçant simplement les centrales thermiques à flamme par des centrales nucléaires. Simultanément, la production d'électricité du pays augmentait de 40 % et la France devenait un important exportateur d'électricité.

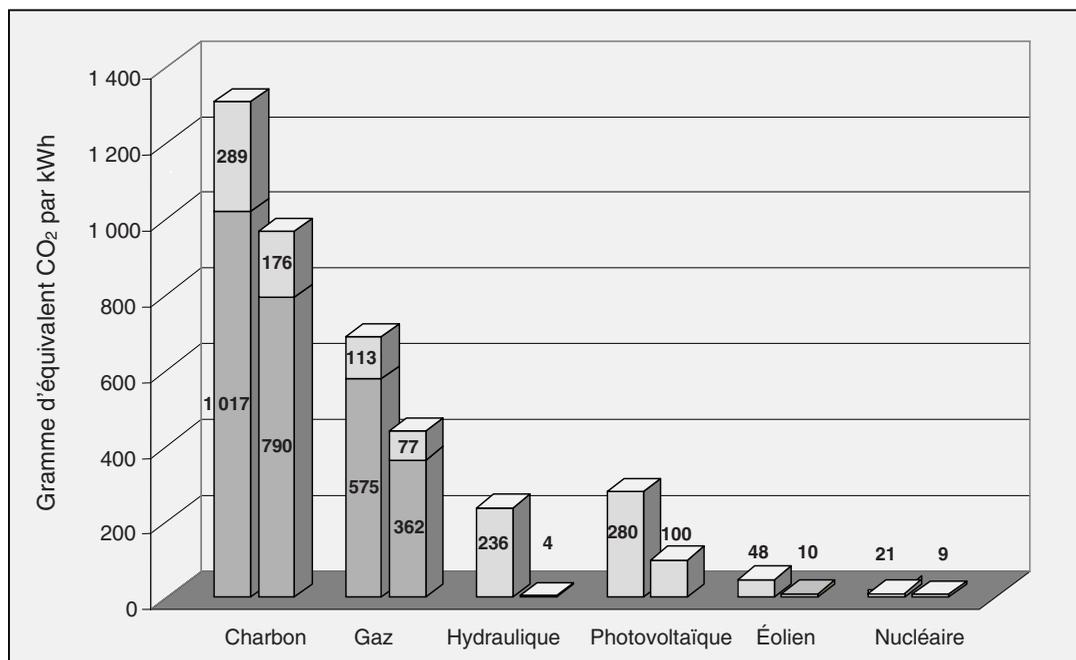
Les oxydes d'azote (NO_x) des centrales thermiques à flamme posent également un problème écologique. S'il existe des concentrations élevées d'hydrocarbures dans l'air, les oxydes d'azote réagissent avec eux pour former un smog photochimique. De plus, les oxydes d'azote ont un effet négatif sur la couche d'ozone qui protège la terre et contribuent par cette voie à accroître la quantité de lumière ultraviolette qui parvient à la surface de la terre. Les centrales nucléaires ne rejettent pas de NO_x.

L'effet de serre est dû à certains gaz présents à l'état de traces dans l'atmosphère terrestre et qui piègent les rayonnements de forte longueur d'onde, comme la chaleur émise par la surface de la terre. L'accumulation de gaz à effet de serre, et notamment de CO₂, provoque un réchauffement du climat dans de nombreuses régions du monde qui, s'il se poursuit, pourrait modifier les schémas météorologiques et entraîner d'autres bouleversements.

Bien que la connaissance de ce phénomène progresse, on ignore toujours combien de dioxyde de carbone l'environnement peut absorber et comment se maintient l'équilibre mondial en CO₂ à long terme. Les scientifiques toutefois sont de plus en plus préoccupés par la lente ascension des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère de la planète, due à la combustion des combustibles fossiles carbonés. Les déforestations progressives viennent accentuer l'effet de serre en diminuant la photosynthèse qui permet d'éliminer le CO₂ dans l'atmosphère. Aujourd'hui, l'effet sur le climat mondial de l'augmen-

tation des niveaux de CO₂ est devenu un facteur déterminant lorsque l'on compare la production d'électricité avec des combustibles fossiles et la production électronucléaire (figure AE.1).

Figure AE.1 Par rapport au charbon, la consommation de 22 tonnes d'uranium (26 tU₃₀₈) permet d'économiser un million de tonnes de CO₂ (Hore-Lacy, 2003)



La combustion des combustibles fossiles produit chaque année dans le monde environ 25 milliards de tonnes de CO₂. Près de 38 % sont imputables au charbon et 43 % au pétrole. Une centrale de 1 000 MWe brûlant du charbon rejette aux alentours de 7 millions de tonnes par an de CO₂. Si l'on utilise du lignite, cette production passe à 9 millions de tonnes. En revanche, l'utilisation d'uranium dans les centrales nucléaires ne produit pas d'émission de ce type.

Description du cycle du combustible nucléaire

Les principales activités du cycle du combustible nucléaire sont les suivantes :

- extraction ;
- traitement ;
- raffinage et conversion ;
- enrichissement ;
- fabrication du combustible ;
- retraitement du combustible usé ;
- traitements des déchets ;
- stockage.

Il existe deux configurations possibles du cycle (AIEA, 1996) :

- Le cycle ouvert dans lequel le minerai est converti en combustible puis passe dans le réacteur une fois et est ensuite entreposé dans l'attente d'un stockage définitif (figure AE.2).

- Le cycle fermé avec retraitement dans lequel le combustible passe une première fois dans le réacteur, est retraité et passe une deuxième fois dans le réacteur (figure AE.3).

Figure AE.2 Cycle ouvert des réacteurs à eau ordinaire et réacteurs à eau lourde

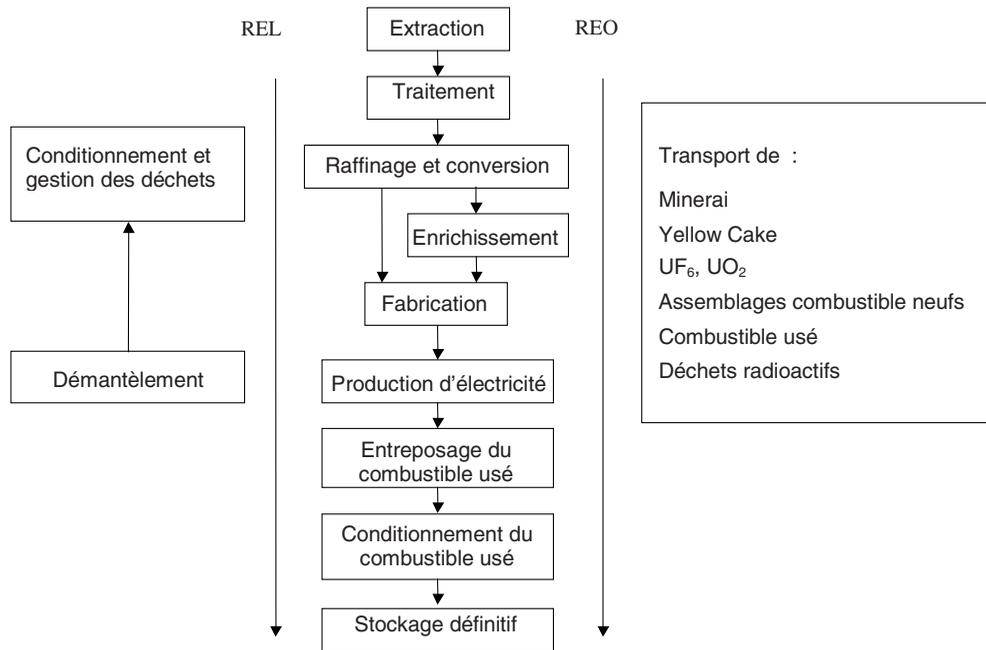
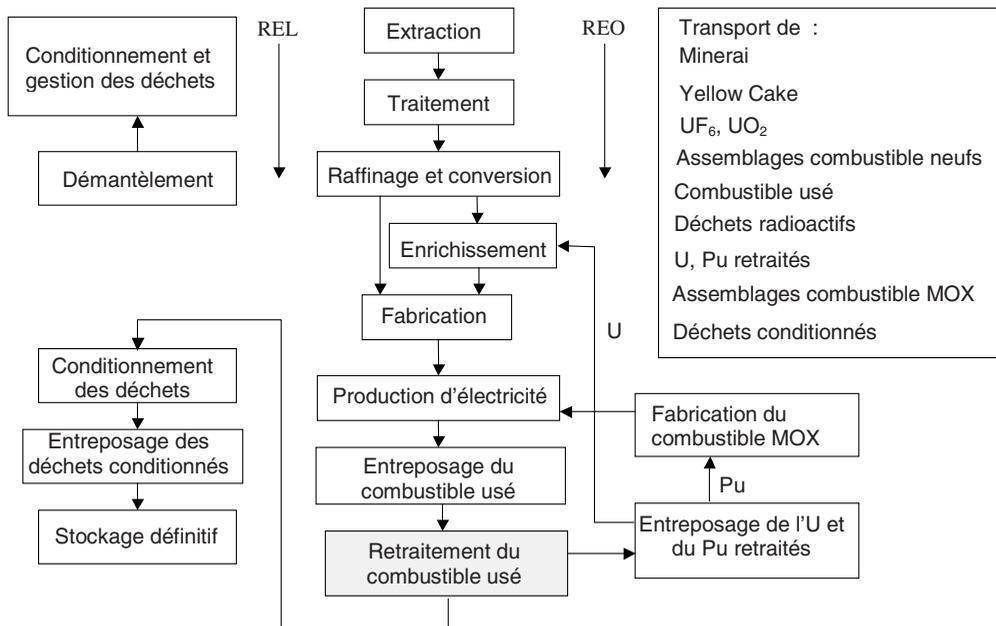


Figure AE.3 Exemple d'un cycle avec retraitement pour les REO et REL



Il existe des cycles avec retraitement plus compliqués que celui présenté sur la figure AE.3 avec des étapes supplémentaires et/ou modifiées. On en trouvera une illustration sur le tableau suivant (Jansma, 2001). La différence entre le cycle ouvert et le cycle avec retraitement tient au fait que le cycle avec retraitement utilise plus efficacement le combustible parce qu'il extrait le Pu et recycle 1^{235}U . Avec le recyclage, la consommation d'uranium naturel des réacteurs peut diminuer de 35 %.

Tableau AE.1 Différents types de cycles du combustible nucléaire

Étape du cycle du combustible	Cycle ouvert	Cycle au MOX	Cycle avec retraitement avancé
Étapes amont	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction et traitement de l'uranium • Conversion • Enrichissement • Fabrication du combustible 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction et traitement de l'uranium • Conversion • Enrichissement • Fabrication du combustible à partir de l'uranium de retraitement 	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction et traitement de l'uranium • Conversion • Enrichissement • Fabrication du combustible
Étapes supplémentaires		<ul style="list-style-type: none"> • Retraitement • Fabrication du combustible MOX 	<ul style="list-style-type: none"> • Retraitement (classique) • Retraitement avancé • Production de différents types de combustibles et de cibles
Production d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Exploitation d'une centrale nucléaire chargée en UOX 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploitation d'une centrale nucléaire chargée en UOX et en MOX 	<ul style="list-style-type: none"> • Exploitation d'une centrale nucléaire • Parc hétérogène de centrales nucléaires • Utilisation possible d'accélérateurs
Étapes aval	<ul style="list-style-type: none"> • Entreposage • Stockage définitif 	<ul style="list-style-type: none"> • Entreposage • Stockage définitif 	<ul style="list-style-type: none"> • Entreposage • Stockage définitif

Les opérations de fabrication annexes au cycle du combustible nucléaire ainsi que la construction des installations ont été estimées avoir des effets secondaires, indirects et peu importants sur l'environnement. En revanche, le démantèlement des centrales nucléaires a un impact significatif lié au traitement et au stockage des matières contaminées et à la quantité de déchets (AIEA, 1994).

Répercussions sur l'homme et sur l'environnement

Le grand public se préoccupe de plus en plus de la protection de l'environnement et des espèces vivantes autres que l'homme. Pour répondre à ces préoccupations, l'AIEA a proposé de faire porter les études d'impact sur l'environnement sur trois éléments (AIEA, 1995) :

- impact sur l'homme ;
- impact sur les ressources (terres agricoles, eau potable, etc.) ; et
- impact sur l'écologie.

Concernant la protection de la faune et de la flore, des analyses récentes fondées sur des informations générales et des hypothèses prudentes ont montré que l'application des normes actuelles de radioprotection valables pour le public suffit généralement à protéger les autres espèces (plantes et animaux) et que seule l'association de conditions écologiques particulières telles que la présence d'espèces rares ou en danger et d'éléments perturbateurs particuliers peut exiger des analyses spécifiques aux sites (AIEA, 1992).

Dans le cas des installations du cycle du combustible nucléaire, la stratégie de protection de l'environnement consiste à respecter les normes nationales et internationales de radioprotection qui s'appliquent à l'homme. Dans le cadre de cette stratégie, on procède à une surveillance et des études de l'environnement à toutes les étapes de l'exploitation de l'installation.

Conséquences non radiologiques

Dans les installations du cycle du combustible nucléaire, on utilise de multiples produits chimiques et équipements qui sont souvent les mêmes que ceux qu'emploient d'autres industries. Les effets de ces produits chimiques et matériels sont aussi très proches. De la même manière, la stratégie de protection de l'environnement contre des substances autres que radiologiques libérées dans l'environnement par les installations du cycle du combustible nucléaire s'alignera pour l'essentiel sur celle d'autres industries non nucléaires. Les mesures prises pour éviter la pollution de l'environnement incluent des codes de bonnes pratiques, des systèmes de traitement ainsi qu'une bonne culture de sûreté.

La surveillance et les études de l'environnement effectuées pour les contaminants radiologiques incluront la surveillance et les études des contaminants non radioactifs. Le tableau AE.2 montre les causes potentielles de perturbation de l'environnement ainsi que les remèdes (AIEA, 1996).

Tableau AE.2. Causes potentielles de perturbation de l'environnement et remèdes

Facteur	Remède
Extraction et traitement	
Perturbation temporaire des sols	réaménagement/pratiques adaptées
Emission de SO _x	désulfuration
Poussières de silice	ventilation/filtres
Radon et produits de filiation	ventilation, noyage ou couverture solide
Métaux lourds	traitement des effluents
NH ₃	élimination
Production d'acides	neutralisation/couvertures imperméables
Résidus	installation de stockage des résidus conçue pour ralentir la migration des radionucléides et réduire les émissions de radon
Raffinage et conversion	
Perturbation temporaire des terrains	réaménagement
Déchets solides de faible activité	stockage dans des dépôts de déchets
NH ₃	récupération
Acides	pratiques adaptées
HF + F ₂	collecteurs+ lavage/neutralisation
TBP organiques + kérosène	pratiques adaptées
Résidus de CaF ₂	stockage dans des dépôts de déchets

Tableau AE.2. Causes potentielles de perturbation de l'environnement et remèdes (suite)

Facteur	Remède
Enrichissement	
Perturbation temporaire des terrains	réaménagement
SO _x + NO _x libérés lors de la production d'électricité	traitement des fumées
Eau contaminée (anions et quelques métaux)	dilution et rejet
Boues	rétenion
Fabrication de l'UO₂	
Perturbation temporaire des terrains	réaménagement
HF	lavage et filtres
Effluents liquides (activité faible ou négligeable)	neutralisation
NH ₃ + composés de l'azote	recupération
Acides forts	pratiques adaptées
Démantèlement	techniques classiques
MOX	
Perturbation temporaire des terrains	réaménagement
Rejet dans l'atmosphère	filtres
Effluents liquides (activité faible ou négligeable 1 à 5 kBq/m ³)	surveillance et rejet
Déchets liquides de faible ou moyenne activité	conditionnement en matrice de déchets solides
Déchets solides	incinérés ou compactés puis bétonnés en vue de leur gestion
Entreposage du combustible utilisé	
Perturbation temporaire des terrains	réaménagement
Effluents	enrobage dans du béton
Rejets dans l'atmosphère	filtres
Stockage du combustible utilisé	
Option future	
Retraitement du combustible utilisé	
Déchets liquides de haute activité	concentration et vitrification
Déchets de moyenne et faible activité	concentration et solidification
Effluents liquides	surveillance, filtration, échange d'ions
Rejets atmosphériques	lavage et filtres
Produits chimiques et danger classique	conception des installations et pratiques adaptées

Impact radiologique

Dans les conditions normales d'exploitation, de petites quantités de substances radioactives peuvent être rejetées dans l'environnement et sont donc susceptibles d'avoir un effet sur la population et l'environnement.

Toute composante ou étape du cycle du combustible est susceptible d'avoir des conséquences négatives sur l'environnement. De plus, la conception et l'exploitation d'une des composantes du système peuvent avoir une influence majeure sur les effets environnementaux d'autres composantes. C'est pourquoi il convient d'évaluer dans sa globalité la performance environnementale d'un système proposé.

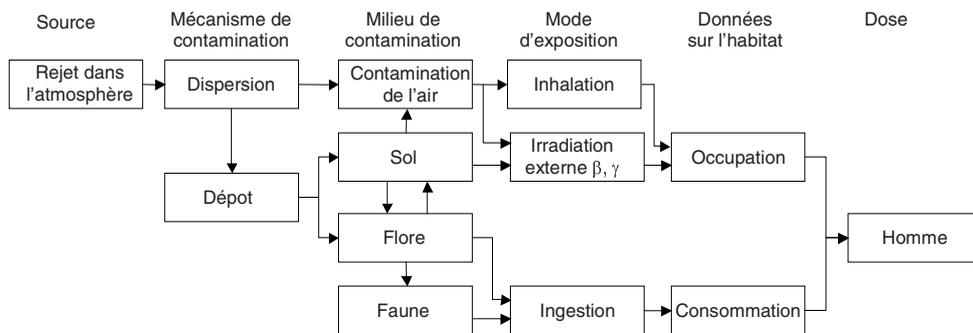
Les effets environnementaux négatifs prévus doivent respecter les normes réglementaires en vigueur au moment de l'évaluation. On consultera à titre d'exemple l'étude de l'Union européenne ExternE (CE, 1996) consacrée à l'évaluation des répercussions de différents systèmes de production d'énergie et qui a montré que la production électronucléaire a un impact relativement faible. Or, les performances environnementales des nouveaux systèmes nucléaires devraient être meilleures que celles des systèmes actuels.

Les effets potentiels sur l'environnement d'une installation nucléaire concernent les rejets chimiques radioactifs et non radioactifs, les rejets de chaleur et l'énergie mécanique. L'impact réel de ces facteurs de perturbation peut varier dans de fortes proportions suivant la situation géographique mais aussi avec d'autres facteurs propres au site ou au projet.

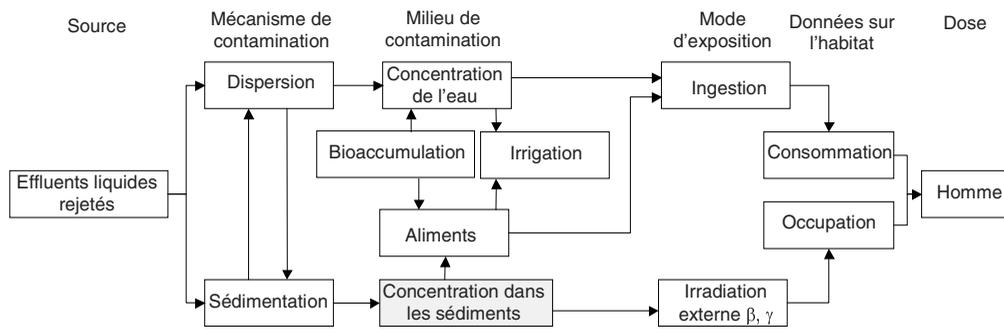
Répercussions sur l'homme

Les répercussions du cycle du combustible nucléaire sur l'homme s'évaluent en termes de dose. Les doses reçues par le public peuvent être calculées par une méthode connue sous le nom d'analyse des voies d'exposition. La figure AE.4 illustre des ensembles de voies d'exposition représentatifs de ceux que l'on pourrait être amenés à étudier dans une analyse de ce type. Pour effectuer cette analyse, il convient de connaître les voies de transfert dans les chaînes trophiques humaines et les paramètres de transfert entre chaque maillon de la chaîne trophique.

Figure AE.4 Voies d'exposition représentatives d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet nucléaire



Représentation schématique des voies d'exposition atmosphérique



Représentation schématique des voies d'exposition aquatique

Les doses d'exposition professionnelle sont en revanche évaluées le plus souvent par des mesures directes plutôt que par des modélisations. Les organisations internationales telles que l'UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) ont largement contribué à la collecte, l'analyse et la présentation systématiques des informations dans ce domaine. Dans son rapport de 2000 à l'Assemblée générale des Nations unies, ce Comité a évalué, pour les diverses étapes du cycle du combustible, les doses collectives normalisées reçues par le public et les doses annuelles d'exposition professionnelle reçues par des travailleurs soumis à un suivi (tableaux AE.3 et 4). Les doses efficaces collectives normalisées, locales et régionales, – qui sont effectivement reçues un ou deux ans après le rejet – représentent 3 hommes- sieverts par GWe par an et sont dues principalement aux rejets dans l'atmosphère des réacteurs et mines dans les conditions normales d'exploitation.

Les doses efficaces annuelles s'échelonnent entre 0,001 et 0,02 mSv dans le cas des membres du public les plus exposés et pour les principaux types de centrales nucléaires. Les chiffres annuels correspondants pour des usines de retraitement du combustible modernes se situent entre 0,01 et 0,05 mSv.

On mesure également l'impact du combustible nucléaire à l'aide du concept de dose collective. Cette notion permet de prendre en compte les répercussions au niveau local ou régional ainsi qu'au niveau mondial. Le lecteur pourra trouver un complément d'informations sur le calcul de ces données (UNSCEAR, 2000).

Tableau AE.3. Dose efficace collective normalisée reçue par le public du fait du cycle du combustible nucléaire (UNSCEAR, 2000, annexe C)

Source	Dose efficace collective normalisée (homme-Sv/GW(e)an)				
	1970-1979	1980-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1997
Compartiment local et régional					
Extraction	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190
Traitement	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
Résidus d'extraction et de traitement (rejets sur cinq ans)	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
Fabrication du combustible	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Exploitation du réacteur					
→ rejets dans l'air	2.800	0.700	0.4	0.400	0.400
→ rejets dans l'eau	0.400	0.200	0.06	0.050	0.040
Retraitement					
→ rejets dans l'air	0.300	0.100	0.060	0.030	0.040
→ rejets dans l'eau	8.200	1.800	0.110	0.100	0.090
Transports	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100	< 0.100
Total (chiffres arrondis)	12	3.1	0.970	0.920	0.910

**Tableau AE.4. Exposition professionnelle de travailleurs faisant l'objet d'un suivi 1990-1994
(UNSCEAR, 2000, annexe E)**

Étape du cycle du combustible	Travailleurs suivis (milliers)	Dose efficace collective annuelle moyenne (homme-Sv)	Dose efficace collective normalisée (homme-Sv/GW(e).an)	Dose efficace annuelle (mSv)	
				Travailleurs suivis	Travailleurs exposés à des doses mesurables
Extraction	69	310	1.72	4.50	5.0
Traitement	6	20	0.11	3.30	
Enrichissement	13	1	0.02	0.12	
Fabrication	21	22	0.10	1.03	2.0
Exploitation des réacteurs	530	900	3.90	1.40	2.7
Retraitement	45	67	3.00	1.50	2.8
Recherche	120	90	1.00	0.78	2.5
Total (chiffres arrondis)	800	1 400	9.80	1.75	3.1

Étude d'impact sur l'environnement

En général, dans les études d'impact sur l'environnement on considère que l'environnement est composé de systèmes en interaction qui, à leur tour, comprennent des éléments biologiques – flore et faune – ainsi que des éléments physiques – l'atmosphère, la terre et l'eau. On considère comme impact les effets qui altèrent le système existant de manière provisoire ou permanente. Toutefois, la définition et la mesure de cet impact dépend au plus haut point de la situation géographique, du pays et de facteurs économiques et sociaux.

La figure AE.5 illustre les facteurs qui interviennent dans une évaluation des effets environnementaux d'un système nucléaire (AIEA, 2004) et fait apparaître les relations de cause à effet. Les effets environnementaux recouvrent généralement les transformations physiques, chimiques et biologiques de l'environnement ; les effets sur la santé, la qualité de vie et les conditions de subsistance de l'homme, de la faune et de la flore ; les effets sur l'économie ; la consommation et l'épuisement des ressources, ainsi que les effets résultant de l'influence conjuguée du système et d'autres influences sur l'environnement.

Dans l'étude d'impact sur l'environnement, tous les effets sont pertinents, qu'ils soient radiologiques ou non. Un cycle du combustible nucléaire peut avoir des effets négatifs sur l'environnement qu'il convient de prendre en compte dans l'évaluation du système. Mais il faut aussi être conscient du fait que ce système peut avoir des effets bénéfiques sur l'environnement. Par exemple, l'énergie nucléaire peut avoir un rôle essentiel pour atteindre les objectifs d'émission fixés dans le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Même si l'étude d'impact sur l'environnement insiste plutôt sur les effets négatifs et les moyens de les atténuer, il importe de ne jamais oublier les effets bénéfiques.

La figure AE.6 illustre les flux de matières et de déchets dans un cas général. Chaque installation du cycle du combustible nucléaire fabrique un produit à partir de matières premières et utilise, pour ce faire, des ressources (énergie, eau et sol) et des réactifs qui, eux-mêmes, produisent des déchets solides et rejettent des effluents dans l'air, l'eau et le sol. Ces rejets, radioactifs ou non, peuvent avoir un impact sur l'homme (travailleurs et grand public) et sur d'autres espèces voire sur l'environnement physique, et provoquer des changements de la qualité de l'eau, des sédiments et de l'air. Étant donné

la longue durée de vie de certains radioéléments rejetés, il faudra éventuellement tenir compte des phénomènes de concentration et de bioamplification au cours de l'étude d'impact environnemental.

Figure AE.5 Facteurs pris en compte dans une étude d'impact sur l'environnement

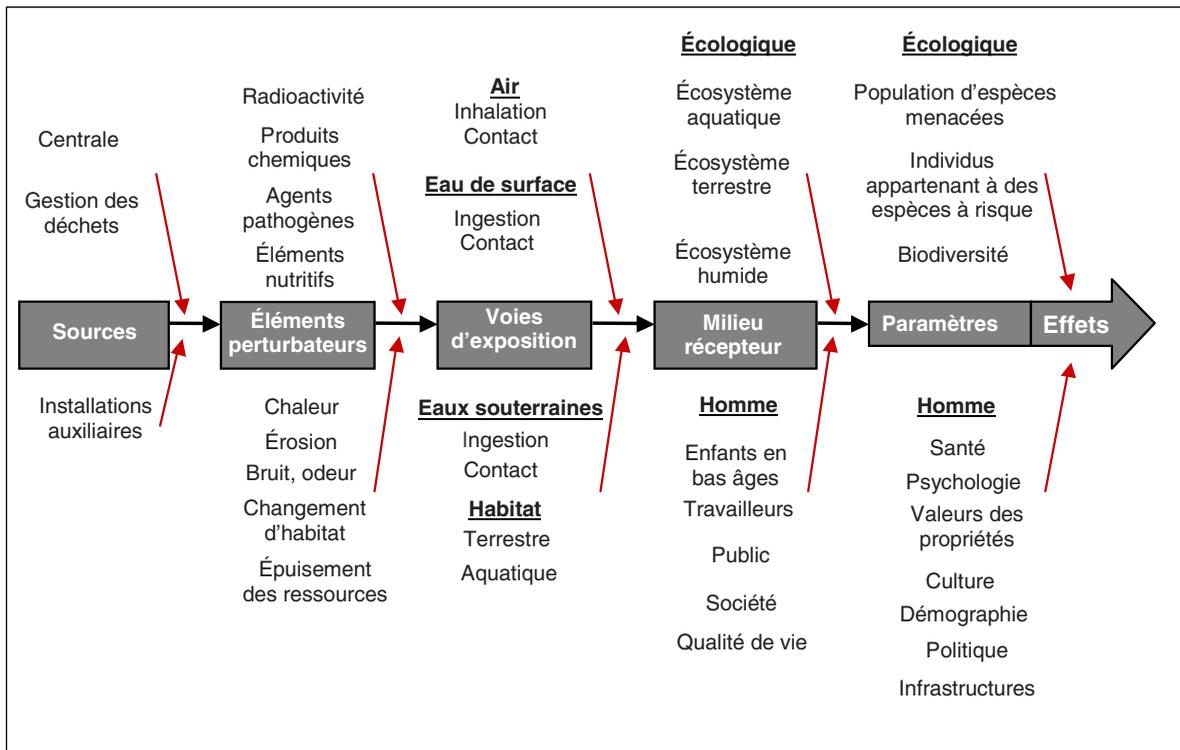
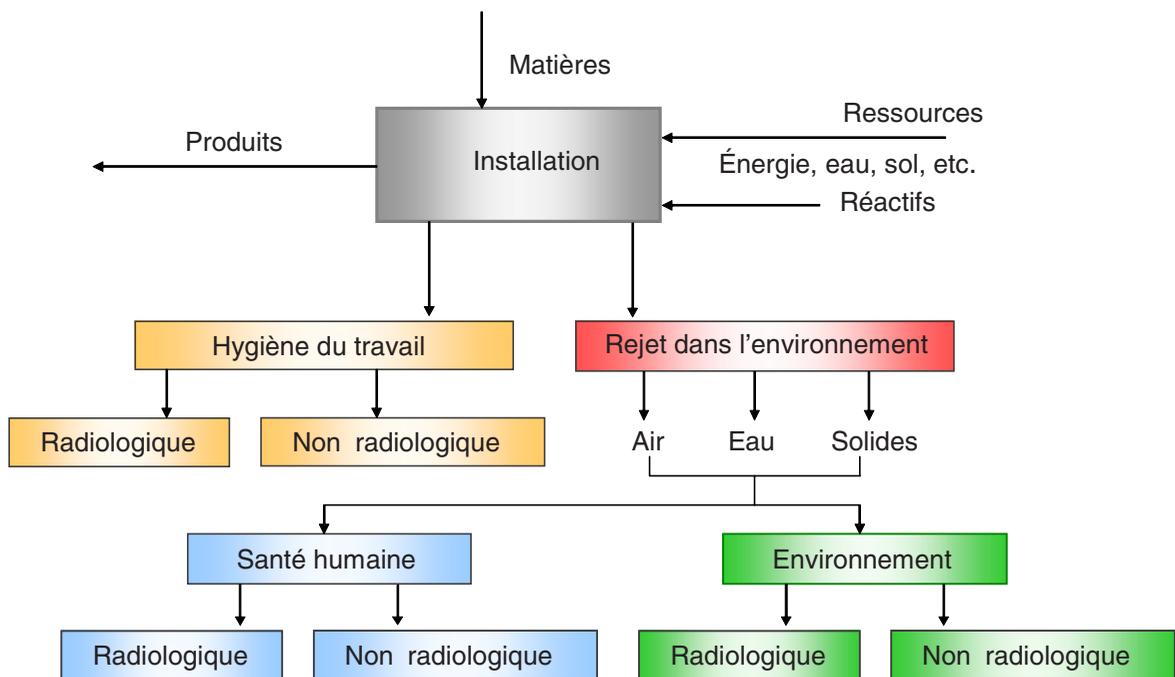


Figure AE.6 Impact sanitaire – travailleurs et public



L'étude d'impact devient obligatoire dans la pratique réglementaire de nombreux pays. Dans le passé, plusieurs rapports ont été consacrés aux effets du cycle du combustible nucléaire sur l'environnement et notamment *Environmental Survey of the Uranium Fuel Cycle* (US-AEC, 1974), où il était question des aspects environnementaux d'un cycle du combustible nucléaire de REO. Le rapport analysait ainsi la consommation de ressources naturelles (terrains, eau et combustibles fossiles), les effluents (chimiques, radiologiques et thermiques) et les effets sur l'environnement. Les ouvrages intitulés « Incidences sur l'environnement de la production et de l'utilisation de l'énergie, partie II, énergie nucléaire » (PNUE, 1979), et *Nuclear Energy and the Environment* (PNUE, 1980) ont été publiés dans le cadre d'études d'impact sur l'environnement de différentes sources d'énergie. Ces rapports traitent des effets radiologiques et non radiologiques de chaque étape de l'exploitation de l'énergie nucléaire. *Nuclear Power, the Environment and Man* (IAEA, 1982) présente des informations techniques entre autres sur l'énergie nucléaire et ses répercussions sanitaires et environnementales.

Le rapport du Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) contient des informations sur les études d'impact radiologique (UNSCEAR, 2000).

Pour le cycle du combustible nucléaire, on peut également recourir à l'étude de sûreté nucléaire dans l'étude d'impact environnemental pour traiter des conditions accidentelles. Les études de sûreté nucléaire sont un moyen d'analyser et d'évaluer la probabilité d'accidents et d'identifier les mesures à prendre pour l'abaisser et limiter les conséquences des accidents. Les contre-mesures appropriées permettront de réduire au minimum le rejet de substances dangereuses de même que les répercussions sanitaires et environnementales. L'AEN a publié en 1993 une étude complète de la sûreté des installations du cycle du combustible nucléaire (AEN, 1993).

Résumé

La production d'électricité, quelle que soit la source d'énergie primaire, a des effets sur l'environnement.

Dans le cas de l'énergie nucléaire, les aspects environnementaux sont liés à des spécificités des réacteurs nucléaires et des installations du cycle du combustible. Les performances environnementales du système nucléaire étudié sont donc un élément essentiel dont dépendra l'acceptabilité future du système ainsi qu'un aspect important de l'évaluation des techniques nucléaires actuelles et futures.

Les exigences environnementales peuvent être réparties en deux catégories : celles qui sont imposées au système nucléaire lui-même et celles qui sont imposées aux méthodes employées pour évaluer l'impact sur l'environnement.

S'agissant des installations du cycle du combustible nucléaire, le principal aspect à prendre en compte est l'impact radiologique des différentes étapes du cycle sur l'environnement. Toutefois, il existe aussi, aux diverses étapes du cycle, diverses sources potentielles d'impact non radiologique dont il convient de tenir compte de manière satisfaisante. Ces impacts peuvent aussi être des effets positifs, par exemple des rejets de gaz à effet de serre réduits au minimum.

Références

Van Den Berg N.W., *et al.* (1995), *Beginning LCA; A guide into environmental life cycle assessment*, Centre des sciences de l'environnement, Université de Leyde, Leyde.

Bringezu, S., *et al.*, eds. (1997) *Analysis for Action: Support for Policy towards Sustainability by Material Flow Accounting*, in Proceedings of the ConAccount Conference 11-12 septembre, 1997, Wuppertal Special 6, Institut de Wuppertal, Wuppertal.

Dones, R., *et al.*, (1996), *Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland*, PSI Report No. 96-07, Villigen, Suisse.

Commission européenne (1996), ExternE, *Externalities of Energy, DGXII Science, recherche et développement, JOULE Programme Reports, Volume 1: Summary Report* (EUR 16520 EN), CE, Bruxelles, Belgique.

Hore-Lacy, Ian (2003), *Nuclear Electricity, Seventh Edition*, Uranium Information Centre Ltd., ISBN 0-9593829-8-4, Melbourne, Australie.

AIEA (1982), *Nuclear Power, the Environment and Man*, AIEA, Vienne, Autriche.

AIEA (1992), *Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at levels implied by current radiation protection standards*, AIEA Collection Rapports techniques, n° 332, Vienne, Autriche.

AIEA (1994), *Decommissioning of Facilities for Mining and Milling of Radioactive Ores and Closeout of Residue*, Collection Rapports techniques n° 362, Vienne, Autriche.

AIEA (1995), *Guidelines for the Comparative Assessment of the Environmental Impacts of Wastes from the Generation of Electricity*, IAEA TECDOC-787, Vienne, Autriche.

AIEA (1996), *Health and environmental aspects of nuclear fuel cycle facilities*, AIEA-TECDOC-918, Vienne, Autriche.

AIEA (1999), *Health and Environmental Impacts of Electricity Generation System : Procedures for Comparative Assessment*, Collection Rapports techniques, n° 394, AIEA, Vienne, Autriche.

AIEA (2004), *Methodology for the assessment of innovative nuclear reactors and fuel cycles*, Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), IAEA-TECDOC-1434, Vienne, Autriche.

ISO (2000), *Norme internationale ISO 14042 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Évaluation de l'impact du cycle de vie*, ISO 14042 : 2000(E), Genève, Suisse (2000).

Jansma, R. et F. van Gemert (2001), *Environmental Aspects of Recycling*, NRG Report 21439/01.38367/P, Petten, septembre 2001.

Ministère de l'énergie atomique de la Fédération de Russie (2001), *Livre blanc de l'énergie nucléaire*, Moscou, Fédération de Russie.

AEN (1993), *La sûreté du cycle du combustible nucléaire*, OCDE, Paris.

PNUE (1979), *Incidences sur l'environnement de la production et de l'utilisation de l'énergie*, Partie H, Énergie nucléaire, PNUE, Nairobi, Kenya.

PNUE (1980), *Nuclear Energy and the Environment*, PNUE, Nairobi, Kenya.

UNSCEAR (2000), *Sources and Effects of Ionizing Radiation – Report to the General Assembly*, Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, New York, NY, États-Unis.

USAEC (1974), *Environmental Survey of the Uranium Fuel Cycle*, WASH-1248, USAEC, Washington, DC, États-Unis.

Annexe F

ACRONYMES

A

AEC	<i>Atomic Energy Commission (Japan)</i>
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIE	Agence internationale de l'énergie

C

COEX	Co-extraction des actinides
------	-----------------------------

D

DFA	Déchets de faible activité
DHA	Déchets de haute activité
DMA	Déchets de moyenne activité

G

GANEX	Extraction groupée des actinides
GNEP	<i>Global Nuclear Energy Partnership</i>

J

JAEA	<i>Japan Atomic Energy Agency</i>
------	-----------------------------------

M

MEXT	Ministère de l'Éducation, de la Culture, du Sport, de la Science et de la Technologie (Japon)
MIMAS	<i>Micronised masterblend</i> (procédé de fabrication de combustible MOX)
MOX	Combustible à mélange d'oxydes

P

PFVL	Produits de fission à vie longue
------	----------------------------------

R

REL	Réacteurs à eau lourde
REO	Réacteurs à eau ordinaire
REP	Réacteur à eau sous pression
RHT	Réacteur à haute température
RNR	Réacteur à neutrons rapides

U

UE	Union européenne
UFE	Uranium faiblement enrichi
UHE	Uranium hautement enrichi
UME	Uranium moyennement enrichi
UOX	Combustible à l'oxyde d'uranium
URT	Uranium de retraitement
UTS	Unités de travail de séparation

V

VVER	Réacteurs à eau ordinaire sous pression de conception soviétique
------	--

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16

IMPRIMÉ EN FRANCE

(66 2007 03 2 P) ISBN 978-92-64-03256-9 – n° 55626 2007



Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables

L'intérêt pour l'énergie nucléaire va croissant dans de nombreux pays en raison de sa capacité d'accroître la sécurité d'approvisionnement énergétique et de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur électrique. Dans ce contexte, les matières recyclables deviennent un atout pour élargir la base des ressources de combustible nucléaire à moyen et à long termes.

Ce rapport dresse un bilan général des stocks de matières fissiles et fertiles recyclables susceptibles d'être réutilisées dans les combustibles nucléaires. Il passe en revue les solutions disponibles pour la gestion de ces matières, que ce soit par leur recyclage et/ou leur stockage définitif. La valeur énergétique potentielle des matières recyclables est évaluée en tenant compte de la variabilité du contenu énergétique récupérable pour différentes matières en fonction des choix technologiques et stratégiques faits par les détenteurs des matières.

Les analyses présentées dans ce rapport devraient intéresser les décideurs du secteur énergétique et les spécialistes du cycle du combustible nucléaire.

