

Questions stratégiques et politiques liées à la transition des systèmes nucléaires thermiques aux systèmes rapides



**Questions stratégiques et politiques liées
à la transition des systèmes nucléaires
thermiques aux systèmes rapides**

© OCDE 2009
AEN no. 6353

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 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.

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.

Publié en anglais sous le titre :
Nuclear Development

Strategic and Policy Issues Raised by the Transition from Thermal to Fast Nuclear Systems

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE 2009

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.

Photo de couverture : Atalante, Marcoule, France.

AVANT-PROPOS

De nombreuses études ont été publiées récemment par des instituts nationaux et des organisations internationales, y compris l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN), sur les aspects scientifiques et techniques de la transition entre les systèmes nucléaires à neutrons thermiques et rapides. Cependant, la mise en œuvre de scénarios de transition soulève un certain nombre de questions stratégiques et politiques importantes qui n'avaient pas encore été étudiées en profondeur. L'objectif essentiel de la présente étude entreprise sous l'égide du Comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) est d'identifier et d'analyser ces questions stratégiques et d'en tirer des enseignements, des conclusions et des recommandations pour les décideurs.

L'étude, effectuée par un groupe d'experts, s'appuie sur une analyse de scénarios de transition développés aux niveaux national, régional et international qui ont fourni les éléments de base pour identifier les opportunités et les défis associés à ces scénarios et les questions stratégiques qui attendent les gouvernements et l'industrie envisageant de s'engager dans la transition des systèmes nucléaires thermiques aux systèmes rapides.

Les enseignements de l'étude mettent en évidence la nécessité d'évaluer les avantages et les inconvénients des scénarios de transition d'une manière holistique, en tenant compte des aspects à court et à long termes et en considérant à la fois les dimensions sociale, environnementale et économique. Ses conclusions montrent que la viabilité des scénarios de transition et le succès de leur mise en œuvre requièreront un engagement à long terme de la part des décideurs ainsi qu'une planification globale cohérente. L'étude illustre également le rôle possible de la coopération internationale et des projets multinationaux pour faciliter la mise en œuvre des scénarios de transition.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	3
SYNTHÈSE	7
1. INTRODUCTION	9
1.1 Contexte	9
1.2 Objectifs et portée de l'étude	10
1.3 Méthode de travail.....	10
1.4 Études antérieures et projets en cours	11
1.5 Plan du rapport	16
Références	17
2. MISE EN PERSPECTIVE DES SCÉNARIOS DE TRANSITION	19
2.1 Évolution de la demande d'énergie et de la production d'électricité	19
2.2 Évolution des technologies nucléaires	24
Références	32
3. PROMESSES ET DÉFIS DES SCÉNARIOS DE TRANSITION	35
3.1 Contexte	35
3.2 Possibilités offertes par les scénarios de transition	37
3.3 Problèmes posés par les scénarios de transition.....	40
Références	42
4. CONSIDÉRATIONS STRATÉGIQUES	43
4.1 Initiatives intergouvernementales	43
4.2 Niveau de développement technologique et facteurs industriels	45
4.3 Facteurs économiques	51
4.4 Rôle des pouvoirs publics	58
Références	64
5. SCÉNARIOS ILLUSTRATIFS : PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET PRINCIPALES CONCLUSIONS	65
5.1 Contexte	65
5.2 Méthodologies d'étude des scénarios de transition.....	66
5.3 Présentation générale de quelques scénarios illustratifs.....	67
5.4 Enseignements des études de scénarios de transition.....	77
5.5 Problèmes généraux	78
Références	80
6. RÉSULTATS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	81

1. Liste des participants	85
2. Glossaire	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Enjeux des systèmes nucléaires de la Génération IV	27
Tableau 2.2	Panorama des systèmes de Génération IV	29
Tableau 4.1	Capacité mondiale de production d'uranium jusqu'en 2030 (10^3 t d'U/an)	46
Tableau 4.2	Estimation des besoins mondiaux en uranium pour les réacteurs de puissance	46
Tableau 4.3	Principales capacités mondiales d'enrichissement (10^3 UTS/an)	47
Tableau 4.4	Puissance nucléaire installée par filière de réacteur.....	48
Tableau 4.5	Stocks de combustible usé à la fin de 2005 (10^3 tML).....	49
Tableau 4.6	Combustible usé déchargé chaque année	50
Tableau 4.7	Principales capacités de retraitement dans le monde (tML/an).....	50
Tableau 5.1	Stratégies potentielles à un ou deux niveaux lorsque les réacteurs existants sont des REO.....	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Illustration d'une évolution possible du cycle du combustible nucléaire aux États-Unis	13
Figure 1.2	Scénario nucléaire type pour le Japon.....	15
Figure 1.3	Concept de système nucléaire RNR.....	16
Figure 2.1	Consommation d'énergie par habitant dans différentes régions	21
Figure 2.2	Projections de la puissance nucléaire mondiale jusqu'en 2050 (GWe)	23
Figure 2.3	Projections de la puissance nucléaire installée (GWe) pour deux scénarios du GIEC	24
Figure 2.4	Génération de réacteurs	26
Figure 2.5	Évolution des systèmes nucléaires et des usines de retraitement du combustible	32
Figure 3.1	Estimation des besoins en uranium naturel avec différents modes de recyclage	38
Figure 4.1	Nombre et âge des réacteurs en service en 2008.....	49
Figure 4.2	Exemple de distribution des coûts de la RD-D et d'une centrale de série standard.....	53
Figure 4.3	Représentation schématique des étapes du cycle du combustible nucléaire	56
Figure 4.4	Coûts de production moyens pour différents systèmes nucléaires.....	57
Figure 5.1	Scénario de transition et déploiement de réacteurs en France	71
Figure 5.2	Options de gestion future des matières nucléaires	72
Figure 5.3	Scénarios de transition japonais	73
Figure 5.4	Demande cumulée d'uranium naturel (scénarios japonais)	74
Figure 5.5	Quantité cumulée d'AM dans les DHA (scénarios japonais)	74
Figure 5.6	Projet russe de système nucléaire innovant à l'équilibre	76

SYNTHÈSE

Cette étude sur la transition des systèmes nucléaires à neutrons thermiques aux systèmes à neutrons rapides a été conduite sous l'égide du Comité pour les études techniques et économiques et le cycle du combustible (NDC). Elle a bénéficié des travaux antérieurs et en cours du Comité des sciences nucléaires (CSN) sur les aspects scientifiques et techniques des scénarios de transition. Ses principaux objectifs étaient de fournir un aperçu des questions stratégiques et politiques soulevées par la transition et de tirer des enseignements, des conclusions et des recommandations à l'attention des décideurs sur les enjeux et les défis liés à l'introduction de systèmes à neutrons rapides dans un parc de réacteurs à neutrons thermiques.

Les analyses présentées dans le rapport sont basées sur une revue d'études de scénarios de transition effectuées par des instituts nationaux et internationaux dans des contextes divers et avec des hypothèses de base différentes. Ces études couvrent un large éventail de situations en termes de contexte global et de programme électronucléaire. Elles illustrent les différents buts possibles de passer d'un système nucléaire basé sur des réacteurs à neutrons thermiques à un système intégrant des réacteurs à neutrons rapides dans différentes régions et différents pays. Les approches adoptées pour effectuer la transition décrites dans les différentes études donnent un aperçu sur les stratégies que peuvent envisager les décideurs et les résultats qu'elles permettent d'obtenir.

Les résultats des différentes études montrent que la pertinence d'entreprendre la transition vers les systèmes à neutrons rapides dépend du rôle futur escompté de l'énergie nucléaire et du développement des technologies nucléaires avancées. La plupart des études prospectives sur la demande et l'offre d'énergie et d'électricité indiquent que l'énergie nucléaire continuera à jouer un rôle notable dans le futur en raison de ses contributions potentielles pour aider à résoudre les problèmes de changement climatique et de sécurité d'approvisionnement. Les programmes de recherche et développement (R-D) ambitieux entrepris dans des cadres nationaux et internationaux devraient aboutir au développement et le déploiement de technologies nucléaires avancées.

Les systèmes à neutrons rapides ont été considérés comme une option intéressante dès le début du développement de programmes électronucléaires mais n'ont pas atteint le même niveau de maturité industrielle et commerciale que les systèmes à neutrons thermiques. Cependant, plusieurs pays ont acquis un retour d'expérience important dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides et des technologies requises pour la fermeture du cycle du combustible, y compris le retraitement du combustible usé et le recyclage du plutonium.

Compte tenu de l'âge et des performances des centrales nucléaires en service, le rôle de l'énergie nucléaire sera vraisemblablement renforcé à la fois par la prolongation de la durée de vie des unités existantes et par le développement de systèmes avancés. Sachant que la durée de vie des centrales en service et en construction devrait dépasser 50 ans, la transition vers des systèmes à neutrons rapides prendra plusieurs décennies. En outre, les systèmes nucléaires de quatrième génération qui sont en développement ne seront pas disponibles pour un déploiement commercial avant deux décennies ou plus. Dans ce contexte, la mise en place de scénarios de transition se poursuivra pendant une longue période couvrant sans doute tout le 21^e siècle.

Les systèmes à neutrons rapides avec cycles fermés offrent la possibilité d'accroître la sécurité d'approvisionnement en énergie grâce à une meilleure utilisation du contenu énergétique de l'uranium naturel et de faciliter la gestion et stockage des déchets radioactifs en réduisant le volume de la radiotoxicité des déchets ultimes. Le recyclage de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs dans les réacteurs à neutrons rapides peut multiplier par 50 ou plus l'énergie produite par unité d'uranium extraite du sol. De plus, il réduit la période pendant laquelle les déchets radioactifs requièrent une surveillance.

Cependant, l'intérêt des systèmes à neutrons rapides et la pertinence d'entreprendre une transition vers ces systèmes varient d'un pays à l'autre. Les paramètres majeurs qui influent sur l'analyse coût/bénéfice de la transition incluent la taille et l'âge du parc électronucléaire, le rôle futur envisagé de l'énergie nucléaire, l'accès aux ressources d'uranium, l'infrastructure nucléaire du pays et son niveau de développement technologique, et la stratégie de gestion des déchets radioactifs adoptée.

Passer du parc actuel de réacteurs à neutrons thermiques à un parc de réacteurs rapides à cycle du combustible fermé est une entreprise ambitieuse. La gestion des matières fissile pendant la période de transition nécessite une planification à long terme minutieuse pour évaluer l'évolution dynamique des flux de matières dans des systèmes changeant continuellement et assurer en permanence la sécurité d'approvisionnement à toutes les étapes du cycle du combustible. Des analyses détaillées des besoins et en matières et services du cycle du combustible sont un préalable essentiel à la mise en œuvre de la transition et doivent être effectuées avec des modèles (codes de calculs) validés et des données fiables.

L'adaptation de l'infrastructure est un autre défi majeur pour assurer le succès de la transition des systèmes à neutrons thermiques aux systèmes à neutrons rapides. La mise en place de capacités industrielles adaptées à la période de transition pourrait s'avérer difficile au niveau national. Des installations multinationales sont susceptibles d'offrir des possibilités d'économie d'échelle et d'optimisation économique inaccessibles au niveau national. La collaboration internationale pourrait aussi faciliter la sécurité d'approvisionnement mondial en services du cycle du combustible tout en limitant le risque de prolifération.

La transition des systèmes à neutrons thermiques aux systèmes à neutrons rapides est un moyen d'atteindre les objectifs de la politique énergétique nationale. Les pouvoirs publics qui sont responsables de la politique énergétique ont un rôle majeur à jouer dans la mise en place de réacteurs à neutrons rapides et de cycles du combustible fermés quand ils s'intègrent dans leurs choix stratégiques. L'adaptation des cadres juridiques et réglementaires, les programmes de R-D, l'éducation et la formation professionnelle, et la stabilité de la politique énergétique nationale sont des aspects clés du rôle et des responsabilités des pouvoirs publics à cet égard.

La renaissance des programmes électronucléaire attendue au cours des premières décennies du 21^e siècle renforcera vraisemblablement l'intérêt des systèmes à neutrons rapides. Des programmes de R-D ambitieux ont été entrepris au plan national dans de nombreux pays et dans le cadre de plusieurs projets multinationaux ; ils devraient conduire à la conception et au développement de réacteurs et d'installations du cycle du combustible avancés répondant aux objectifs de développement durable des pouvoirs publics et de la société.

Toutefois, la mise en place de systèmes à neutrons rapide demandera des efforts soutenus et une coopération internationale accrue pour faire face aux défis de la période de transition. Les chercheurs et les analystes peuvent fournir aux décideurs des données et des informations susceptibles de servir de base solide aux décisions dans ce domaine. Mais, en fin de compte, il revient aux décideurs de prendre les mesures nécessaires pour assurer que les infrastructures seront adaptées aux besoins en évolution et que le contexte national est en phase avec les buts de la politique énergétique.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Au tout début du développement de l'électronucléaire, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) semblaient prometteurs car ils peuvent recycler et produire plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment, ce qui les rend, sur ce plan, plus performants que les réacteurs à neutrons thermiques. Cependant, pour diverses raisons techniques, économiques et stratégiques, ils ont perdu une grande partie de leur attrait, leur développement industriel s'est ralenti et seules quelques tranches de ce type sont aujourd'hui en service.

Or, dans la perspective actuelle d'une relance des programmes nucléaires de plusieurs pays, qui aurait pour effet d'augmenter les besoins en minerai d'uranium et de raviver les inquiétudes au sujet du stockage des déchets de haute activité (DHA) contenant des isotopes à vie très longue, les réacteurs rapides sont à nouveau étudiés avec intérêt, compte tenu de leur potentiel d'incinération des actinides et de surgénération.

Étant donné la composition et l'âge du parc électronucléaire existant, toute stratégie de déploiement de réacteurs rapides avec recyclage de matières nucléaires doit tenir compte des problèmes spécifiques à la période de transition. Les parcs électronucléaires qui mettent en jeu plusieurs filières de réacteurs, utilisées en proportion variable au cours du temps, présentent des possibilités de synergie, mais aussi des contraintes, par exemple, au niveau de la gestion des flux de matières. Les décideurs doivent être conscients des goulets d'étranglement susceptibles d'entraver les stratégies de développement et identifier les éléments indispensables au succès du déploiement des nouveaux systèmes (de quatrième génération). Dans ce contexte, il importe d'analyser l'impact des différents scénarios possibles, depuis le *statu quo* (réacteurs thermiques et cycle ouvert) jusqu'à la transition (passage des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides avec recyclage intégral). L'évaluation des avantages et des inconvénients de chaque approche ne peut se faire qu'après étude des conséquences à long terme des choix effectués aujourd'hui en matière de filières de réacteurs et de cycle du combustible.

C'est dans ce cadre que le Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) a décidé d'inclure dans son programme de travail 2007-2008 un projet d'étude des scénarios de transition axé et plus particulièrement de leurs aspects stratégiques, à conduire en partenariat avec le Comité des sciences nucléaires (CSN).

1.2 Objectifs et portée de l'étude

L'objectif général de l'étude est d'examiner de manière exhaustive les problèmes soulevés par la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides et cycles du combustible associés, en mettant en avant les thèmes intéressant les décideurs. Ses objectifs principaux sont :

- identifier les possibilités et les difficultés liées à la mise en place des scénarios de transition dans divers contextes (par exemple, croissance ou stagnation de la puissance nucléaire installée, parc de centrales nucléaires important ou modeste, situations diverses des industries nationales de l'uranium et du cycle du combustible) ;
- analyser les aspects stratégiques de la transition ;
- tirer des enseignements et dégager des conclusions à l'intention des décideurs.

Mettant à profit les travaux antérieurs de l'AEN et d'autres organisations sur les aspects scientifiques et techniques de scénarios de transition, cette étude se concentre sur les questions d'ordre stratégique. Les analyses reposent sur des exemples de scénarios proposés à titre d'illustration par des experts des pays membres. L'étude recouvre un ensemble de possibilités envisageables dans les pays de l'OCDE. Elle étudie des scénarios de transition dans des pays dotés de programmes nucléaires importants et en expansion, dans des pays équipés d'un nombre limité de réacteurs de puissance ainsi que dans des pays ayant décidé d'arrêter leur production électronucléaire mais qui pourraient néanmoins être intéressés par des systèmes rapides pour incinérer les actinides.

L'analyse des exemples fournis permet d'identifier les principaux moteurs de la transition, ainsi que les facteurs les plus susceptibles d'en faciliter le déroulement et d'améliorer l'efficacité des différentes stratégies.

1.3 Méthode de travail

L'étude s'appuie sur certains travaux antérieurs de l'AEN, en particulier le rapport de synthèse sur les scénarios de transition préparé par le CSN et la publication du NDC intitulée *Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables* (OCDE, 2007). Les conclusions d'autres études et publications d'organisations internationales – principalement l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), la Commission européenne et des établissements nationaux – viennent compléter les données de l'AEN et enrichir l'analyse.

L'étude a été menée par un groupe *ad hoc* d'experts nommés par le NDC et le CSN. Ce groupe s'est réuni à trois reprises en 2007 et 2008 pour :

- définir les objectifs et la portée précise de l'étude ;
- élaborer la table des matières du rapport final ;
- recueillir des informations et des données, notamment des rapports sur des études de cas nationales ;
- passer en revue les données et informations collectées, en vérifier l'exhaustivité et la cohérence ;
- analyser les données et en tirer des enseignements et des conclusions ;
- rédiger un rapport.

Le projet de rapport a été soumis pour examen et approbation au NDC et au CSN avant sa publication par l'OCDE.

1.4 Études antérieures et projets en cours

Étant donné le regain d'intérêt de nombreux pays pour le nucléaire, plusieurs études ont été réalisées ou en cours pour traiter les problèmes susceptibles de se poser si la puissance nucléaire installée continue de croître. Dans ce contexte, les réacteurs rapides constituent une solution séduisante puisqu'ils permettent d'exploiter plus efficacement le contenu énergétique des matières fissiles. Par conséquent, de nombreuses études portant sur les scénarios de transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides ont été publiées ou sont en chantier. La section qui suit en présente un aperçu non exhaustif.

Deux études parues récemment, qui avaient été menées dans le cadre du programme de travail du NDC, exposent les raisons qui justifient l'application de programmes de transition, et apportent des éclairages préliminaires sur leur faisabilité et leurs impacts potentiels. Le rapport intitulé *Cycles du combustible nucléaire avancés et gestion des déchets radioactifs* (AEN, 2006) établit les flux massiques d'un grand nombre de cycles avancés possibles puis les compare, à l'équilibre, en termes de demande d'uranium naturel, de volume et de radiotoxicité des déchets et de compétitivité économique. Le rapport intitulé *Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables* (AEN, 2007) s'intéresse aux problèmes de l'entreposage, du stockage et/ou de la réutilisation des matières fissiles et fertiles, et conclut en identifiant les principaux arguments en faveur du passage des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides.

Sous les auspices du CSN, un Groupe d'experts sur les scénarios de transition entre cycles du combustible a été constitué en octobre 2004. Sa mission est de collecter et d'analyser des informations sur les problèmes liés à la transition des cycles actuels à des cycles durables à long terme, ou à l'abandon de l'énergie nucléaire. Elle recouvre l'ensemble des technologies existantes et futures applicables pendant la période de transition, parmi lesquelles la transmutation et le stockage du combustible usé, le développement et l'évaluation de scénarios de transition ainsi que l'analyse de l'impact de la transition sur les réacteurs et les installations du cycle du combustible.

Ce Groupe d'experts a achevé un rapport de synthèse, à paraître en 2009, qui inclut les scénarios nationaux de l'Allemagne, de la Belgique, du Canada, de l'Espagne, des États-Unis, de la France, du Japon, de la République de Corée et du Royaume-Uni ainsi qu'une liste de technologies identifiées comme indispensables au déploiement de cycles du combustible avancés. Il a également commencé l'examen de scénarios de transition régionaux (européens) et mondiaux en vue d'analyser l'impact des différentes stratégies et politiques et le rôle et les caractéristiques des installations régionales. Enfin, une étude comparative des résultats des codes d'analyse de scénarios mis au point par les pays membres est en cours.

Le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible innovants (INPRO), lancé en 2000 sous les auspices de l'AIEA, a notamment pour objectif d'étudier les mesures d'incitation, les conditions et les principales étapes du déploiement à grande échelle de systèmes d'énergie nucléaire innovants (INS). En particulier, les scénarios de transition seront analysés dans le contexte du projet collaboratif sur l'Architecture globale de systèmes d'énergie nucléaire innovants faisant appel à des réacteurs à neutrons thermiques et rapides comportant des cycles du combustible fermés (GAINS). Ce projet est mené conjointement par l'Argentine, la Belgique, la Biélorussie, le Canada, la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon, la République de

Corée, la République tchèque, la Slovaquie, l'Ukraine, et la Commission européenne, ainsi que la Bulgarie, l'Italie et l'AEN à titre d'observateurs. Les objectifs du projet GAINS sont les suivants :

- élaborer un cadre (méthodologie commune, hypothèses et conditions aux limites) dans lequel évaluer la transition, jusqu'à l'horizon 2100, des réacteurs thermiques actuels vers un déploiement durable de l'énergie nucléaire ;
- développer un scénario qui serve de référence pour la conception de la structure d'un parc global capable de répondre aux exigences de l'approvisionnement énergétique de façon durable, compte tenu des différences entre régions en termes de disponibilité des ressources matérielles, de taux de croissance de la demande d'énergie et de modes de déploiement ; et
- réaliser des études de sensibilité pour évaluer l'impact des différentes hypothèses clés et analyser l'influence des scénarios de transition sur les paramètres de durabilité (définis selon la méthodologie INPRO).

Il est prévu que le projet GAINS se déroule sur trois ans et comprenne quatre grandes étapes : sélection de scénarios de croissance de la puissance nucléaire ; identification des options du cycle du combustible ; simulation du déploiement de l'énergie nucléaire pour différentes structures du parc ; analyse des résultats.

La Commission européenne soutient l'action de coordination PATEROS (*Partitioning and Transmutation European Roadmap for Sustainable Nuclear Energy*, CE, 2008a) car elle considère qu'un cycle du combustible fermé reposant sur des procédés de séparation et de transmutation permettrait d'exploiter durablement l'énergie nucléaire tout en réduisant la radiotoxicité et la charge thermique des déchets à stocker dans des dépôts géologiques. L'objectif principal de l'action est de formuler un plan européen de déploiement des technologies de séparation et de transmutation jusqu'à l'échelle de l'usine pilote, pour tous les éléments du système. Cet objectif est pertinent aussi bien les pays dotés de programmes nucléaires à long terme que ceux qui n'ont pas l'intention de développer leurs parcs nucléaires.

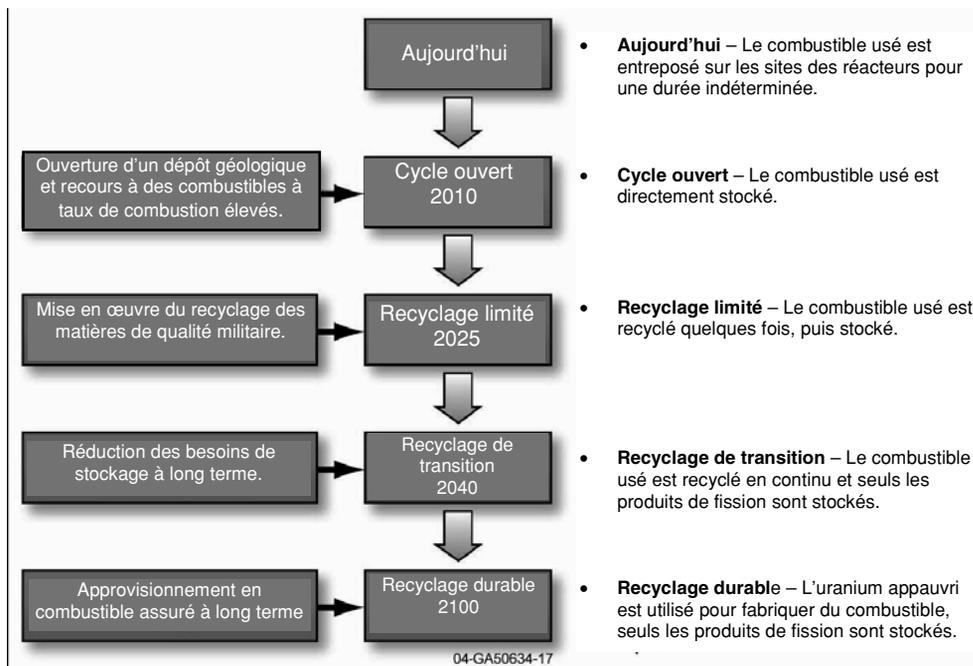
Le but est d'établir une feuille de route globale de l'industrialisation de la technologie de séparation et de transmutation, avec identification des étapes critiques, des options privilégiées et des solutions de repli, compte tenu des calendriers et des objectifs définis en commun au niveau européen. Le nombre et la taille des installations requises – parmi lesquelles les réacteurs rapides, aussi bien critiques que sous-critiques – dépendront de la stratégie et des objectifs de la politique nucléaire spécifique de chaque État de l'Union européenne. Toutefois, l'un des buts communs à toutes les stratégies de séparation et de transmutation est d'alléger la gestion à long terme des déchets, c'est-à-dire de réduire la radiotoxicité, le volume et la charge thermique des DHA nécessitant un stockage définitif. Les stratégies possibles vont du recyclage global des actinides dans des réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération à l'exploitation de réacteurs rapides dédiés à la transmutation dans une strate distincte du cycle du combustible. Toutes ces stratégies permettraient de fortement réduire la quantité d'actinides mineurs (AM) stockés en dépôt, que l'on maintienne, développe ou abandonne la production électronucléaire.

L'objectif du projet RED-IMPACT (CE, 2008b) de la Commission européenne était d'étudier l'impact des technologies de séparation, de transmutation et de réduction des déchets sur le stockage en formation granitique, argileuse ou saline. L'étude visait à analyser dans quelle mesure le recyclage des matières permettrait de réduire la toxicité et la charge thermique des déchets et, par voie de conséquence, la longueur des galeries à prévoir dans les dépôts. Deux scénarios – industriel et innovant – ont été étudiés et, pour chaque scénario, trois configurations différentes ont été analysées à l'état d'équilibre. Dans le cas du scénario industriel, les calculs ont été effectués pour un cycle du combustible ouvert avec stockage direct, le monorecyclage du plutonium dans des réacteurs à eau sous

pression (REP) et le multirecyclage du plutonium dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Dans le cas du scénario innovant, ils ont été effectués pour des réacteurs rapides de quatrième génération avec recyclage homogène des actinides mineurs, des systèmes à double strate simplifiés (REP et systèmes hybrides) et des systèmes à double strate (REP, RNR et systèmes hybrides).

À la demande du Congrès des États-Unis, le ministère de l'Énergie (USDOE) a lancé le programme *Advanced Fuel Cycle Initiative* afin d'étudier plusieurs scénarios d'évolution de la demande d'énergie nucléaire ainsi que diverses stratégies de gestion du combustible usé (USDOE, 2005). À l'issue de cette étude, une approche a été recommandée, qui permet de résoudre de façon prudente et flexible les questions des répercussions environnementales, des risques de prolifération et de la durabilité des ressources en uranium. L'approche préconisée prévoit, dans un premier temps, la mise en œuvre d'une forme limitée de recyclage dans les réacteurs existants pour commencer à incinérer le plutonium et les actinides mineurs du combustible usé des réacteurs à eau ordinaire (REO) ; dans un deuxième temps, une phase transitoire de recyclage dans un parc de réacteurs anciens (thermiques) et nouveaux (rapides) permettant de modifier radicalement la nature et l'impact environnemental des déchets nucléaires ; enfin, dans un troisième temps, la mise en place d'une infrastructure de recyclage durable composée de nouveaux réacteurs dont le combustible principal serait les matières recyclées. La figure 1.1 illustre cette évolution en donnant un calendrier approximatif.

Figure 1.1 Illustration d'une évolution possible du cycle du combustible nucléaire aux États-Unis



Source : USDOE, 2005.

Deux études principales de scénarios de transition sont en cours en France. La première s'intéresse à la gestion des déchets et vise à établir des bases scientifiques et techniques solides sur lesquelles puissent se fonder les décisions politiques qui doivent être prises avant 2015, conformément à la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. La seconde se concentre sur la consommation d'uranium à long terme et les coûts des cycles du combustible dans le contexte de la mise en œuvre de systèmes nucléaires de quatrième génération. Des analyses de scénarios de transition applicables à l'échelle mondiale, réalisées avec des modèles et outils informatiques mis au point pour étudier le cas de la France, ont été présentées lors de diverses

conférences internationales (Masara *et al.*, 2007 ; Delpech *et al.*, 2007). Ces analyses illustrent des aspects fondamentaux des scénarios de transition concernant les besoins en uranium, la gestion et le stockage des déchets.

Dans la première étude française, différents types de scénarios de transition ont été analysés, à partir des résultats des études entreprises en application de la loi de 1991, en faisant l'hypothèse d'une puissance nucléaire installée constante en France. Des analyses des systèmes à l'équilibre ont été effectuées pour plusieurs scénarios de transition. Les options considérées étaient les suivantes : recyclage des actinides mineurs dans des REP (Np+Am+Cm ou Am seul), recyclage (homogène ou hétérogène) des AM dans des RNR et recyclage des AM dans des systèmes hybrides. Des analyses environnementales et économiques ont ensuite été réalisées (CEA, 2005).

Pour les études menées en application de la nouvelle loi de 2006, il est prévu que les évaluations de scénarios de transition soient conduites par des organismes de recherche en partenariat avec l'industrie. Des scénarios de transition robustes seront analysés en fonction de leur capacité de remplir les objectifs suivants :

- amélioration de la forme des déchets ultimes à vie longue ;
- gestion du plutonium adaptée au déploiement de RNR ;
- optimisation de l'utilisation des usines de retraitement existantes ; et
- renforcement de la résistance à la prolifération.

Dans le cadre de ces études, on utilisera des codes de calcul sûrs et validés pour obtenir des données quantitatives sur la composition isotopique des matières et sur les volumes et les types de déchets. Les objectifs sont d'examiner et d'évaluer la faisabilité industrielle, les coûts et la fiabilité des différents systèmes de séparation-transmutation ainsi que l'impact de la séparation-transmutation sur le stockage (par exemple, capacités requises, inventaires et radioactivité des déchets).

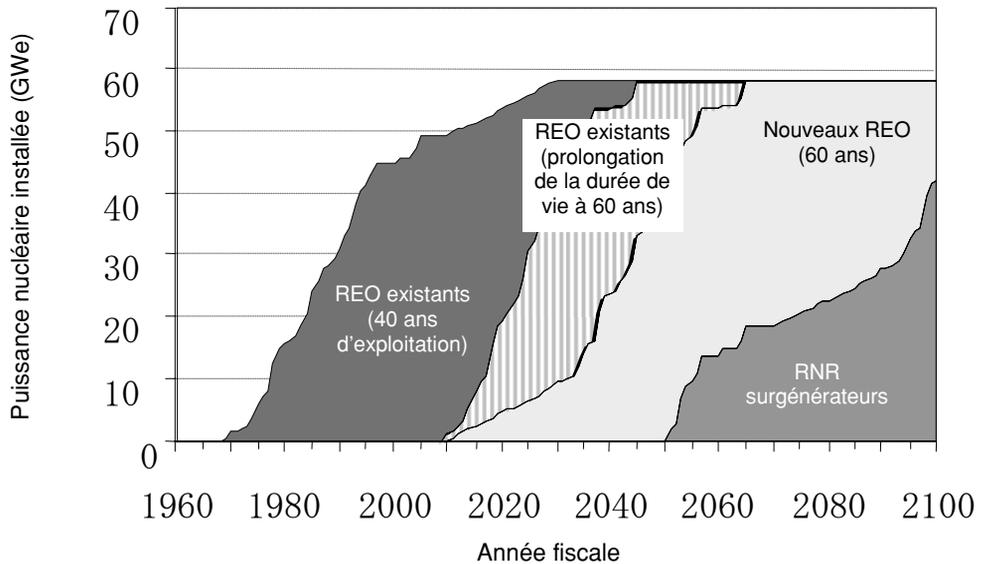
Au Japon, la mise en œuvre de réacteurs rapides est considérée comme un élément clé des stratégies nucléaires nationales, pour des raisons de durabilité et de sécurité de l'approvisionnement. De nombreuses études de scénarios de transition ont été menées. Elles fournissent des analyses des flux massiques ainsi qu'un aperçu des problèmes stratégiques et politiques que permettrait de résoudre la transition vers les RNR (par exemple, Ohtaki et Ono, 2005).

En octobre 2005, la Commission de l'énergie atomique du Japon (AEC) a publié le *Framework for Nuclear Energy Policy* (cadre pour la politique nucléaire) que le gouvernement, ainsi qu'en a décidé le Conseil des ministres le 14 octobre 2005, doit désormais adopter comme principe régissant la recherche, le développement et l'exploitation des sciences et techniques nucléaires. Dans ce document, l'AEC déclare que les RNR constituent une option d'avenir prometteuse pour le cycle du combustible japonais.

Le Japon, dont le secteur nucléaire s'est développé depuis 50 ans, a adopté une politique nationale favorisant le développement du cycle du combustible afin de valoriser au mieux les ressources en uranium et de réduire les quantités de déchets radioactifs de haute activité. L'usine de retraitement de Rokkasho, dont la production annuelle atteindra 800 tonnes de métal lourd (tML), entrera en service en 2009. Une usine de fabrication de combustible à mélange d'oxydes (MOX) est en construction sur le même site. Le plutonium issu du retraitement du combustible utilisé sera recyclé dans des REO sous forme de combustible MOX jusqu'au déploiement de RNR. En 2030, la puissance nucléaire installée devrait avoir atteint 58 GWe, contre 50 aujourd'hui, ce qui permettra de ramener les émissions de CO₂ du Japon à leur niveau des années 90. Cette progression de la puissance nucléaire

installée est établie d'après le scénario de référence du rapport provisoire *Long-Term Outlook for Energy Supply and Demand* (perspectives à long terme de l'offre et de la demande d'énergie) préparé en octobre 2004 par le Sous-comité de l'offre et la demande d'énergie du Comité consultatif sur les ressources naturelles et l'énergie du ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie. Pour la période postérieure à 2030, la puissance nucléaire est supposée se maintenir à 58 GWe. La figure 1.2 illustre un scénario type envisagé au Japon : démantèlement des REO après 40 à 60 ans d'exploitation et déploiement de REO avancés après 2030 ; fin du recyclage du plutonium dans les REO autour de 2045 ; puis, après 2050, remplacement des REO par des RNR à la cadence d'1 GWe par an, jusqu'à l'obtention d'un parc uniquement composé de RNR au début du 22^e siècle.

Figure 1.2 Scénario nucléaire type pour le Japon



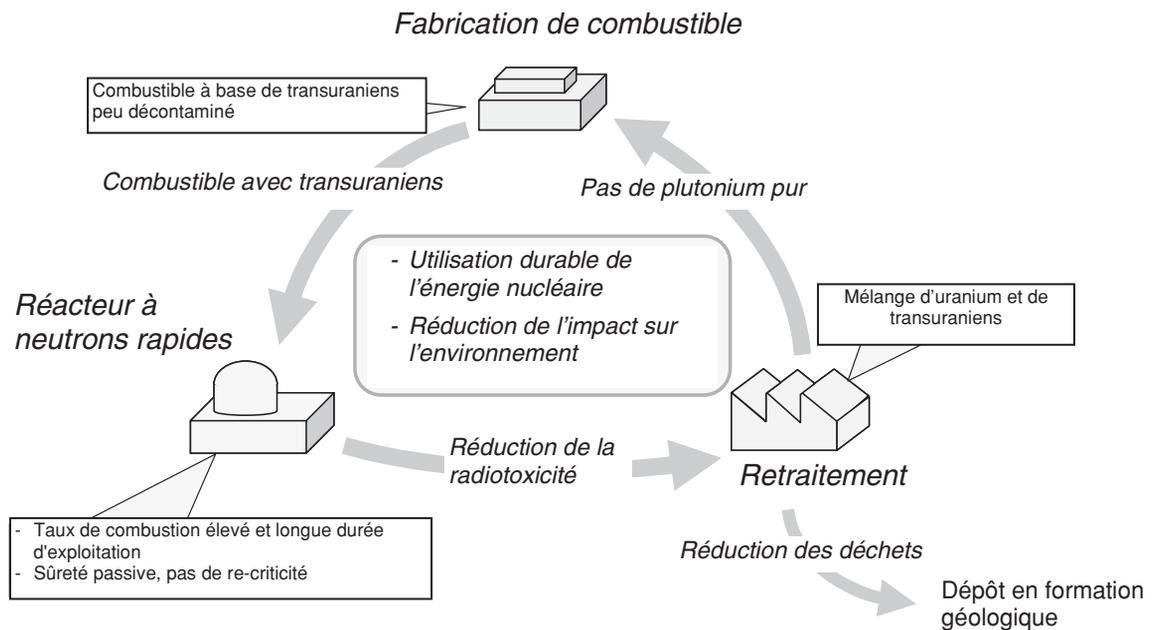
Source : ministère japonais de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, 2004.

La politique japonaise fondamentale consiste, d'une part, à retraiter le combustible utilisé et, d'autre part, à vitrifier l'ensemble des DHA avant de les stocker dans un dépôt géologique. En 1999, le *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI – institut japonais de recherche sur l'énergie atomique), aujourd'hui devenu la *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA – Agence japonaise de l'énergie nucléaire), et la société *Japan Atomic Power Company* ont lancé une étude de faisabilité de systèmes RNR industriels en collaboration avec le *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI – institut central de recherche du secteur de l'électricité) qui évalue plusieurs concepts de RNR. Au cours de la phase 2 de l'étude de faisabilité entreprise en 2001, le cycle avec réacteur rapide à caloporteur sodium a été retenu comme concept principal à l'issue d'une évaluation complète de différents aspects dont la sûreté, la compétitivité économique, la valorisation des ressources, la réduction de l'impact sur l'environnement, la non-prolifération, la faisabilité technique et l'adhésion du public. La figure 1.3 illustre le système envisagé dans le cadre de cette étude.

Dans l'étude de faisabilité, les éléments transuraniens (TRU) ne sont pas considérés comme des déchets, et on suppose que la plupart sont récupérés dans le combustible utilisé des REO et des RNR, pour être recyclés (incinérés) et transmutés dans les RNR. Les actinides mineurs du combustible utilisé des REO seront récupérés dans une deuxième usine de retraitement (à côté de la première usine de

Rokkasho), et 99,9 % des AM du combustible utilisé des RNR seront recyclés dans les RNR en mode homogène. La stratégie fondamentale consiste à remplacer le recyclage du plutonium dans les REO par le recyclage des transuraniens dans les RNR. Les spécifications de la deuxième usine de retraitement ainsi que le mode et l'ampleur du recyclage des AM sont actuellement à l'étude.

Figure 1.3 Concept de système nucléaire RNR



Source : Sato, 2007.

Une autre initiative japonaise, le projet *Options Making Extra Gains from Actinides and Fission Products* (projet OMEGA) a été lancée en 1988 sous l'égide de l'*Atomic Energy Commission*. Ses objectifs sont les suivants : augmentation de l'efficacité et rationalisation du stockage définitif ; amélioration radicale de la sûreté ; utilisation plus efficace des ressources. Dans le cadre du projet OMEGA, la JAEA et le CRIEPI ont effectué des travaux de recherche et développement sur les procédés de séparation et le système de transmutation (système hybride) considérés comme les technologies de base.

1.5 Plan du rapport

Le présent rapport comprend six chapitres si l'on compte le présent chapitre exposant les objectifs et la portée de l'étude, la méthode de travail et récapitulant brièvement d'autres projets en cours.

Le chapitre 2 donne un aperçu de la demande mondiale d'énergie et d'électricité, afin de mettre en perspective les problèmes stratégiques liés aux scénarios de développement nucléaire, en particulier la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides. Il contient des données de base sur les technologies nucléaires et leur évolution au cours des prochaines décennies, en mettant l'accent sur les caractéristiques des différents systèmes susceptibles d'être intégrés aux scénarios de transition.

Le chapitre 3 passe en revue les raisons pour lesquelles différents pays peuvent envisager l'un ou l'autre des scénarios de transition, renforcer la sécurité de leur approvisionnement énergétique et/ou réduire le nombre et la taille de leurs dépôts de déchets de haute activité, par exemple. Il décrit ensuite

les problèmes liés à la mise en œuvre des scénarios, par exemple les travaux de R-D ou les infrastructures nécessaires.

Le chapitre 4 identifie et analyse les problèmes stratégiques et certains problèmes techniques que posent les scénarios de transition en matière de technologie, de faisabilité industrielle et de performances économiques. Il met l'accent sur le rôle de l'État et de la coopération internationale.

Le chapitre 5 récapitule les principales conclusions de plusieurs études de scénarios illustratifs en soulignant les objectifs des différents scénarios et les résultats qui en étaient attendus, et résume les enseignements tirés en termes d'approches stratégiques et de questions posées.

Enfin, le chapitre 6 tire des enseignements et des conclusions des scénarios examinés et analysés dans la présente étude et formule des recommandations à l'intention des décideurs qui souhaiteraient mettre en œuvre des scénarios de transition.

Références

CE (2008a), *RED-IMPACT Project: Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal – Synthesis report*, contrat FI6W-CT-2004-002408 – septembre 2007, Bruxelles, Belgique (à paraître).

CE (2008b), *PATEROS: P&T Roadmap Proposal for Advanced Fuel Cycles Leading to a Sustainable Nuclear Energy* – contrat FI6W-036418, automne 2008, Bruxelles, Belgique (à paraître).

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

AEN (2007), *Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables*, OCDE, Paris, France.

CEA (2005), *Les déchets radioactifs à haute activité et à vie longue – Recherches et résultats – loi du 31 décembre 1991 – axe 1*, CEA/DEN/DDIN/ 2005-568, décembre, Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

Delpech, M. *et al.*, (2007), « Trends on Future Energy Needs and Implication on Uranium Demand », ICAPP, 13-18 mai 2007, Nice, France.

Massara, S. *et al.*, (2007), « Fast Breeder Reactor Scenarios of Nuclear Energy Evolution over the World Scale », ICONNE 2007, 22-26 avril, Nagoya, Japan.

Ohtaki, A. et K. Ono (2005), « Study on Basic Nuclear Scenarios in Japan », ICAPP, 15-19 mai 2005, Séoul, République de Corée.

Sato, K. (2007), « Potential contribution of fast reactor cycle technologies to TRU management in Japan », compte rendu de réunion du Comité technique de l'AIEA sur les stratégies de gestion des matières fissiles pour une énergie nucléaire durable, Vienne, Autriche.

USDOE (2005), *Advanced Fuel Cycle Initiative: Objective, Approach, and Technology Summary*, rapport au Congrès établi par le ministère américain de l'Énergie (USDOE), *Office of Nuclear Energy, Science and Technology*, mai, Washington, D.C., États-Unis.

Chapitre 2

MISE EN PERSPECTIVE DES SCÉNARIOS DE TRANSITION

Ce chapitre décrit le contexte général dans lequel s'inscriront la conception et la mise en œuvre des scénarios de transition. La première section permet d'évaluer la pertinence des scénarios de transition en fonction des perspectives de l'offre mondiale d'énergie. La deuxième section propose un bref aperçu des progrès des technologies des réacteurs nucléaires et du cycle du combustible auxquels on devrait assister au cours des prochaines décennies, qui fait apparaître les types de systèmes nucléaires qui pourraient être déployés pendant la période de transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides.

L'avenir de l'énergie nucléaire sera subordonné à l'évolution de la demande d'énergie primaire et de la consommation d'électricité, ainsi qu'à la place du nucléaire dans le parc énergétique, elle-même dépendante de la compétitivité de l'option nucléaire et de l'adhésion des gouvernements et du public. Cette évolution ne sera pas uniforme et pourra varier d'un pays à un autre. Les incitations à passer des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides seront fonction du rythme de croissance de la production électronucléaire dans le monde et dans chaque région ou pays.

Ce sont avant tout les objectifs stratégiques de chaque État qui détermineront la décision de mettre en œuvre des scénarios de remplacement des réacteurs thermiques par des réacteurs rapides, et la stratégie adoptée à cet effet. Cependant, le niveau de développement technologique sera un facteur limitant car le développement des systèmes à neutrons rapides, réacteurs eux-mêmes et installations du cycle du combustible, est moins avancé que celui des réacteurs à neutrons thermiques.

Le succès des programmes de R-D consacrés aux systèmes à neutrons rapides déterminera dans quelle mesure et à quel horizon les réacteurs et les installations du cycle du combustible seront suffisamment au point sur le plan technologique et compétitifs sur le plan économique pour pouvoir remplacer les systèmes à neutrons thermiques actuellement commercialisés ou en développement.

2.1 Évolution de la demande d'énergie et de la production d'électricité

L'énergie est indispensable au développement économique et social. Avec l'amélioration de la qualité de vie humaine, la demande d'énergie n'a cessé d'augmenter depuis plusieurs décennies. Sa croissance devrait se poursuivre à l'échelle du globe, quand bien même les pays industrialisés réussiraient à améliorer radicalement l'efficacité énergétique de leurs industries et de leurs modes de vie. L'électricité est un vecteur énergétique souple et propre au point de consommation, et qui assure des services, comme l'éclairage, pour lesquels il n'existe aucune autre solution. En outre, elle devrait être de plus en plus utilisée dans le secteur des transports, pour des raisons environnementales mais aussi sous l'effet des politiques de réduction de la dépendance pétrolière. C'est pourquoi il est prévu que, comme on a pu l'observer jusqu'à présent, le rythme de croissance de la demande d'électricité reste supérieur à celui de la demande d'énergie primaire totale.

En dépit des grandes incertitudes qui entourent l'évolution de la demande énergétique et de la consommation d'électricité, notamment à long terme, de nombreuses études faisant autorité fournissent des scénarios indicatifs sur la base desquels il est possible d'effectuer des analyses et de définir des politiques. Ces scénarios servent principalement à mettre en lumière les atouts et inconvénients des différents avenir possibles. Ils ont surtout été élaborés pour faciliter l'identification des conséquences des différents choix de politiques, par exemple la décision de mettre en œuvre, ou au contraire de ne pas adopter, des systèmes à neutrons rapides dans le cadre d'un programme nucléaire national.

Les projections à moyen terme (jusqu'en 2050) présentés ci-après sont issues de travaux récents de l'AEN (AEN, 2008) fondés sur des analyses de l'offre et de la demande d'énergie et d'électricité publiées dans la littérature ainsi que sur des jugements d'experts concernant la part du nucléaire dans les parcs énergétiques. Pour le long terme (jusqu'en 2100), il est fait référence aux scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2000) qui recouvrent un large éventail de variantes possibles de l'approvisionnement total en énergie et de la contribution du nucléaire. Les chiffres ci-après sont fournis à titre d'exemple, pour servir de toile de fond sur laquelle évaluer les aspects stratégiques des scénarios de transition étudiés dans des situations très contrastées de demande énergétique totale. Ils ne doivent pas être considérés comme des prévisions ou des prédictions.

2.1.1 Évolution de la demande d'énergie et d'électricité entre 1980 et 2005

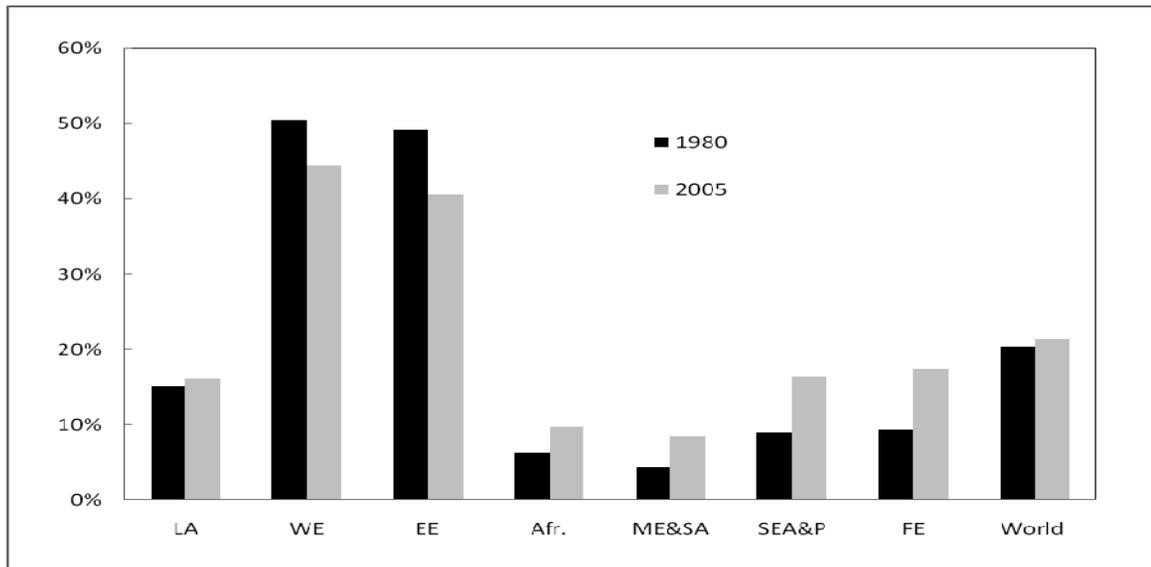
Même si la demande mondiale d'énergie a augmenté de 65 % entre 1980 et 2005, son rythme de croissance moyen (2 % par an) au cours de cette période n'était que légèrement supérieur à celui de la population (1.6 % par an). Par conséquent, la consommation moyenne d'énergie par habitant ne s'est accrue que de 10 %. Par ailleurs, toujours sur la même période, les différences de consommation entre régions ne se sont pas sensiblement réduites, comme on peut le voir sur la figure 2.1 qui indique, en pourcentage de sa valeur en Amérique du Nord, la consommation d'énergie par habitant dans différentes zones du globe en 1980 et en 2005. Étant donné qu'en ce début du 21^e siècle, une proportion non négligeable de la population mondiale n'a pas du tout ou peu accès à l'énergie commercialisée, il faut s'attendre à une poursuite de la croissance de la demande énergétique.

Bien que la part du nucléaire dans la production totale d'énergie se soit fortement accrue depuis le milieu du 20^e siècle elle reste modeste comparée à celle d'autres sources. Les combustibles fossiles étaient la première source d'énergie en 1980 et le sont restés jusqu'en 2005. À l'exception d'une légère baisse aux alentours de 1985, la consommation de pétrole a continuellement augmenté, à un rythme moyen de 1,1 % par an soit inférieur de moitié environ à celui la consommation totale d'énergie. La consommation des combustibles fossiles solides s'est stabilisée après avoir atteint un plateau vers 1990-1995, mais ces combustibles restent néanmoins la source d'énergie privilégiée de pays émergents tels que la Chine et l'Inde. Quant à la biomasse, aux autres énergies renouvelables et à l'énergie nucléaire, leur consommation a progressé au rythme moyen de 5,8, 6,3 et 3,8 % par an respectivement.

Toujours entre 1980 et 2005, la consommation mondiale d'électricité a doublé, progressant plus vite que la demande d'énergie primaire. Même si la répartition régionale de la production d'électricité s'est beaucoup modifiée au cours de cette période, avec une croissance bien plus rapide dans les pays en développement que dans la zone OCDE, les écarts en termes de production d'électricité par habitant restent très marqués. En 2005, la production d'électricité par habitant était près de 20 fois plus faible en Afrique qu'en Amérique du Nord. Au début du 21^e siècle, 85 % des habitants de la planète consomment nettement moins de 4 000 kWh par personne, soit le seuil en-deçà duquel les indicateurs

sociaux, tels que l'espérance de vie et le niveau d'éducation, sont beaucoup plus faibles que dans les pays disposant d'un meilleur accès à l'électricité.

Figure 2.1 Consommation d'énergie par habitant dans différentes régions
(en pourcentage de sa valeur en Amérique du Nord la même année)



Note : LA = Amérique latine ; WE = Europe de l'Ouest ; EE = Europe de l'Est ; Afr. = Afrique ; ME&SA = Moyen-Orient et Asie du Sud ; SEA&P = Asie du Sud-Est et Pacifique ; FE = Extrême-Orient.

Source : AIEA, 2005.

Les centrales thermiques classiques sont restées la première source de production d'électricité entre 1980 et 2005 et, en dépit de la « ruée vers le gaz » dans les pays de l'OCDE, le charbon conserve sa position dominante pour la production d'électricité dans le monde. La contribution des énergies renouvelables à la production totale d'électricité a été multipliée par 4, soit une progression très marquée, mais elle reste néanmoins inférieure à 1 % en 2005. Enfin, l'énergie nucléaire a doublé sa part de marché pour atteindre 16 % en 2005.

2.1.2 Évolution future de la demande d'énergie et d'électricité

Les principaux moteurs de la hausse de la demande totale d'énergie primaire au cours du 21^e siècle seront la forte croissance économique de nombreux pays en développement, à l'origine d'un mode de vie plus gourmand en énergie, et croissance démographiques. La tendance à adopter des procédés moins consommateurs d'énergie dans les pays industrialisés pourrait ralentir le rythme de croissance de la consommation d'énergie primaire, mais ne suffira pas à stabiliser la demande totale. La consommation d'électricité augmentera probablement plus vite que la demande d'énergie primaire, car l'électricité est un vecteur énergétique très souple, facile à utiliser dans le secteur résidentiel et il possède des applications industrielles pour lesquelles il n'existe aucune autre solution.

Les scénarios développés par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour étudier les perspectives technologiques (AIE, 2008) montrent que la demande mondiale d'énergie primaire pourrait presque doubler entre 2005 et 2050 dans une situation de *statu quo* et augmenter de 50 % environ si d'importants progrès technologiques sont réalisés et si les pouvoirs publics prennent des mesures efficaces. À plus long terme, les scénarios du GIEC prévoient des avenir très divers, dont un

scénario de croissance presque nulle entre 2050 et 2100, et un scénario de forte croissance où la consommation mondiale d'énergie primaire est multipliée par 5 en 2100 par rapport à 2005.

L'évolution de l'offre d'énergie primaire par source dépendra des politiques énergétiques adoptées par les différents pays, en particulier concernant la réduction des émissions de carbone pour lutter contre le changement climatique. Cependant, dans tous les scénarios la part des combustibles fossiles reste substantielle jusqu'à la fin du siècle et les contributions des énergies renouvelables même si elles augmentent rapidement, notamment lorsque les gouvernements prennent des mesures pour réduire les rejets de gaz à effet de serre, ne deviennent vraiment significatives qu'après 2050.

Tous les scénarios prévoient également une forte augmentation de la production d'électricité dans les prochaines décennies. En effet, il est nécessaire d'au moins doubler la production actuelle pour que la consommation d'électricité par habitant des pays en développement les plus pauvres atteigne un niveau compatible avec les objectifs sociaux du développement durable.

Selon les scénarios de l'AIE, la production d'électricité devrait atteindre 35 000 à 55 000 TWh d'ici 2050, soit deux à trois fois son niveau actuel. Jusqu'en 2030, la plus forte croissance de la demande est attendue en Chine et en Inde. Dans la zone OCDE, la demande devrait progresser à un rythme plus faible, même si les tendances passées n'indiquent pas de ralentissement substantiel du rythme de croissance de la demande d'électricité dans les pays industrialisés. Dans les autres pays, la croissance économique devrait s'accompagner d'une augmentation continue de la demande d'électricité.

Au-delà de 2050, les divers scénarios prévoient un large éventail de possibilités selon les hypothèses adoptées concernant l'efficacité énergétique et électrique des différentes économies, les modes de vie et les progrès technologiques. D'ici la fin du 21^e siècle, la production mondiale d'électricité pourrait être multipliée par un facteur de quatre à seize, selon les différents scénarios du GIEC.

2.1.3 Projections de la puissance nucléaire installée

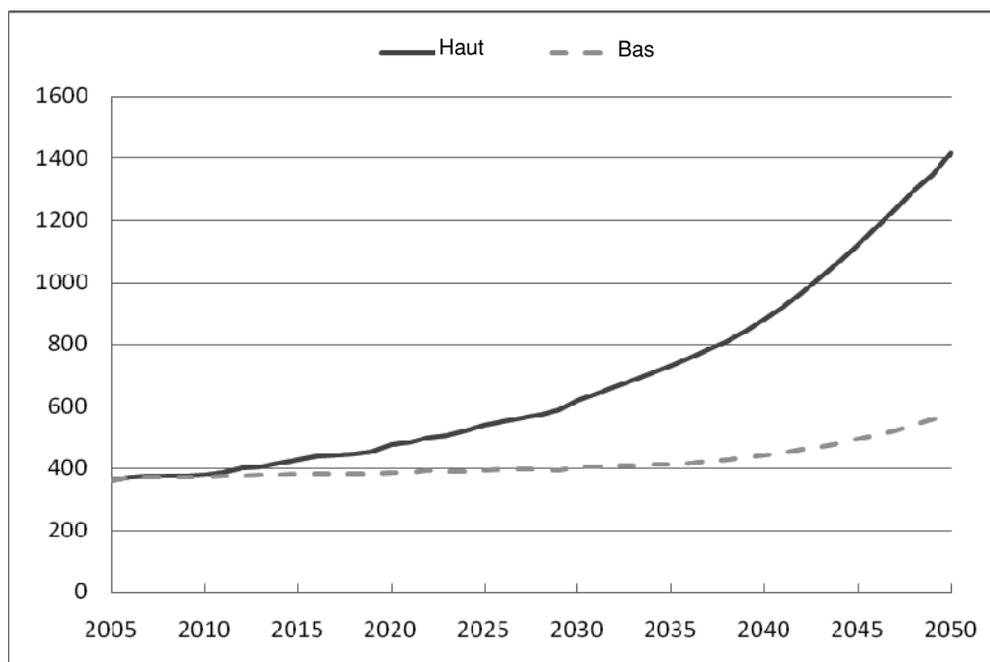
L'évolution de la production électronucléaire sera fonction de la croissance de la demande d'énergie et d'électricité, et de la compétitivité du nucléaire par rapport aux énergies concurrentes. Le rôle futur de l'énergie nucléaire, dans l'approvisionnement en électricité et aussi dans la fourniture d'autres produits, sera également déterminé par les progrès des technologies nucléaires et les politiques nationales.

L'option nucléaire présente des avantages en termes de sécurité d'approvisionnement énergétique, de stabilité des coûts et, ce qui est peut-être plus important dans de nombreux pays et régions, en termes de réduction du risque de changement climatique mondial. Le deuxième point s'explique par la très faible part (environ 5 %) du prix de l'uranium dans le coût de production total, ce qui est un gage de stabilité à long terme des coûts comme des prix. Concernant le changement climatique planétaire, les décideurs admettent désormais qu'il est peu probable qu'on puisse atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre du Protocole de Kyoto et au-delà en appliquant des politiques de *statu quo*. Tous reconnaissent la nécessité de prendre des mesures volontaristes pour décarboniser nos économies.

L'AEN a élaboré deux scénarios d'évolution de la puissance nucléaire jusqu'en 2050, illustrés à la figure 2.2, reposent sur une analyse approfondie des politiques et capacités techniques de différents pays (AEN, 2008). En 2050, avec une puissance installée comprise entre 580 et 1 400 GWe, contre

environ 370 GWe en 2007, l'énergie nucléaire pourrait satisfaire 5 à 13 % de la demande totale d'énergie primaire.

Figure 2.2 Projections de la puissance nucléaire mondiale jusqu'en 2050 (GWe)



Source : AEN, 2008.

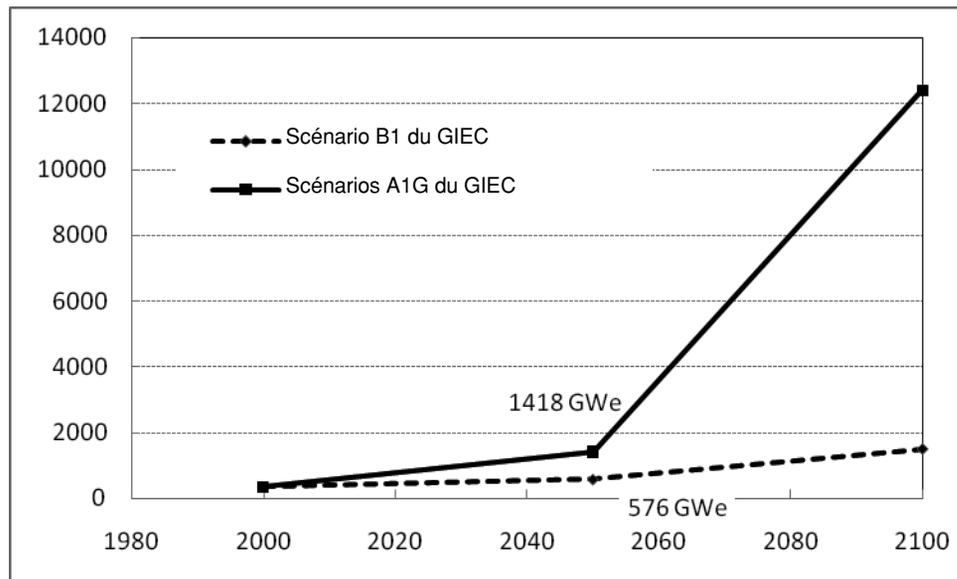
Bien que le rythme de croissance de la puissance nucléaire installée prévu pour les prochaines décennies puisse sembler modeste, il est peu probable que des niveaux supérieurs, qui sont techniquement possibles, soient atteints compte tenu des longs délais de prise de décision et d'autorisation en matière de centrales nucléaires.

Par contre, l'évolution de la puissance nucléaire installée après 2030 pourrait être très variable, du fait de nombreux facteurs liés au climat général dans lequel seront définies les politiques énergétiques et aux avancées des technologies nucléaires. D'un côté, les pays qui souhaitent abandonner le nucléaire pourront opter pour des solutions techniques plus au point, et un nombre croissant de leurs tranches nucléaires seront en fin de vie économique. D'un autre côté, les pays désirant s'engager plus avant sur la voie du nucléaire auront eu le temps de construire les infrastructures et les installations industrielles requises pour s'engager dans d'ambitieux programmes nucléaires.

Pour la période 2050-2100, les projections dérivées des scénarios du GIEC fournissent un large éventail. Le scénario A1G est caractérisé par une croissance économique rapide, une réduction substantielle des différences régionales au niveau du revenu par habitant, une population mondiale atteignant un maximum au milieu du siècle puis déclinant et l'introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Il suppose que les politiques volontaristes sont soit inexistantes, soit inefficaces et que les hydrocarbures, le pétrole et le gaz, continuent de dominer le bouquet énergétique. Le scénario B1 est caractérisée par une croissance économique beaucoup moins importante que les scénarios de type A et une évolution de la population mondiale sensiblement la même, ainsi que par des changements rapides des structures économiques évoluant vers une économie de services et d'information, avec des réductions de l'intensité de matières et l'introduction active de technologies

propres et utilisant les ressources de manière efficace. La figure 2.3 illustre l'évolution projetée de la production électronucléaire jusqu'en 2100, dans les deux scénarios B1 et A1G du GIEC.

Figure 2.3 Projections de la puissance nucléaire installée (GWe) pour deux scénarios du GIEC



Source : GIEC, 2000.

2.2 Évolution des technologies nucléaires

Au cours des premières décennies du développement de l'énergie nucléaire, les réacteurs à neutrons rapides étaient considérés comme une option plutôt prometteuse parce qu'ils permettent d'exploiter efficacement le potentiel énergétique des matières fissiles. Cependant, pour diverses raisons dont le faible prix de l'uranium et les difficultés techniques rencontrées pendant leur déploiement industriel, les RNR ont progressivement perdu leur attrait.

En conséquence, les systèmes nucléaires actuellement exploités sont le fruit de plusieurs décennies de développement industriel de réacteurs thermiques à eau ordinaire et, dans une moindre mesure, à eau lourde. De même, la plupart des centrales en construction ou planifiées sont à réacteurs thermiques. Sauf dans quelques pays, les systèmes RNR en sont au stade des études de conception et, dans le meilleur des cas, il est prévu d'en construire un prototype ou une tête de série d'ici dix à vingt ans.

L'importance désormais accordée par les décideurs aux objectifs de développement durable, qui sous-tendent les politiques énergétiques de nombreux pays, a ravivé l'intérêt pour des technologies permettant de mieux gérer les ressources, par exemple des réacteurs rapides combinés au recyclage. Toutefois, la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides envisagée par certains pays nécessitera plusieurs décennies, sachant que la durée de vie actuellement prévue de la plupart des tranches électronucléaires modernes dépasse 50 ans.

2.2.1 Spécificités des réacteurs à neutrons rapides

Contrairement aux réacteurs thermiques à l'intérieur les neutrons sont ralentis, les réacteurs rapides, qui mettent en jeu des neutrons d'énergie cinétique supérieure, n'ont pas de modérateur. Ils

libèrent plus de neutrons par fission et exploitent davantage le potentiel énergétique de l'uranium car la probabilité de capture des neutrons décroît quand leur vitesse augmente. Grâce au processus de capture neutronique, les neutrons en excès permettent de convertir les matières fertiles comme l' ^{238}U ou le ^{232}Th en matières fissiles.

Les réacteurs rapides peuvent être conçus pour produire plus de combustible qu'ils n'en consomment. Appelés alors « surgénérateurs », ils consomment plus efficacement l'uranium naturel et contribuent à la durabilité à long terme de l'énergie nucléaire. Le recyclage des actinides majeurs, c'est-à-dire l'uranium et le plutonium, diminue la quantité et la radioactivité des matières fissiles contenues dans les déchets. Les réacteurs rapides peuvent également être conçus pour gérer aussi les actinides mineurs et ainsi réduire encore davantage l'inventaire de matières fissiles et les volumes et la radiotoxicité des déchets nucléaires. Appelés alors « incinérateurs » d'actinides, ils contribuent à diminuer le nombre et la taille des dépôts géologiques de stockage des déchets radioactifs de haute activité.

Les RNR présentent l'avantage de pouvoir fonctionner avec un large éventail de compositions du combustible, d'où leur flexibilité et le fait qu'ils puissent être utilisés comme incinérateurs ou comme générateurs d'actinides, selon les objectifs visés. Il est ainsi possible d'alterner au fil du temps les modes d'exploitation, surgénération ou incinération des actinides et *vice versa*, selon l'évolution des buts recherchés.

2.2.2 Développement des technologies nucléaires

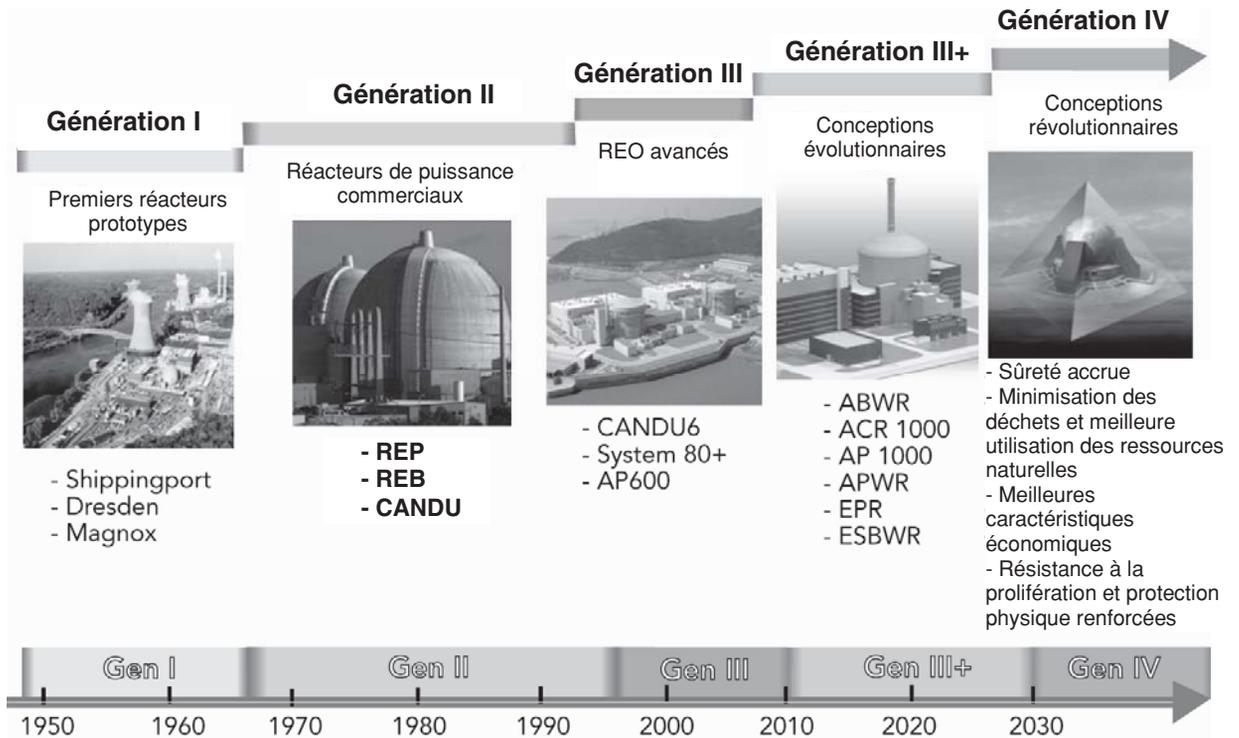
La feuille de route de Génération IV (NERAC/GIF, 2002) propose une vision de l'évolution du nucléaire où les différentes filières de réacteurs sont classées par génération. La figure 2.4 illustre l'évolution des technologies nucléaires depuis le milieu du 20^e siècle.

La première génération comprend les prototypes et les réacteurs des plus anciennes centrales électronucléaires des années 50 et 60. On y retrouve le premier réacteur à eau bouillante (REB) de Dresden 1 et le premier REP de Shippingport, aux États-Unis, ainsi que les premiers RNR et les premières centrales Magnox en Europe. Rares sont les réacteurs de génération I qui sont encore en service aujourd'hui.

La deuxième génération est celle des réacteurs des centrales nucléaires commerciales construites dans les années 70 et 80. Y figurent principalement des réacteurs à eau ordinaire (REB et REP, y compris la filière VVER soviétique) et à eau lourde (PHWR). Les réacteurs refroidis au gaz en service au Royaume-Uni et le RNR à caloporteur sodium français Superphénix sont également de cette génération.

La troisième génération de réacteurs, dont le développement a commencé dans les années 90, réunit des conceptions évolutionnaires, aux caractéristiques de sûreté et performances économiques améliorées. On y retrouve un réacteur à eau lourde sous pression (le CANDU 6) et plusieurs REO (par exemple, le System 80+ et l'AP600). Les conceptions plus récentes des réacteurs de génération III+ présentent des caractéristiques encore plus avancées. Il s'agit notamment de REO et de PHWR, mais aussi de réacteurs à haute température à caloporteur gaz, par exemple, le PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*). La génération III pas plus que la génération III+ ne comptent de RNR. Peu de réacteurs de ces générations ont déjà été construits mais, du fait du regain d'intérêt pour l'option nucléaire, plusieurs d'entre eux ont été commandés ces dernières années. D'autres devraient être construits dans les dix ans à venir.

Figure 2.4 Générations de réacteurs



Source : d'après feuille de route de NERAC/GIF, 2002.

Enfin, les concepts innovants de la quatrième génération offrent la perspective d'une sûreté et de performances économiques encore accrues, d'une meilleure utilisation des ressources naturelles, et d'une résistance à la prolifération et d'une protection physique renforcées. Il n'existe pas encore d'industrie capable de construire ces systèmes car les travaux n'en sont qu'au tout début des études de conception. Il faudra sans doute encore au moins vingt ans de R-D pour atteindre la phase du déploiement industriel. La plupart des systèmes de quatrième génération mettent en jeu des réacteurs à neutrons rapides associés à un cycle du combustible fermé. Le tableau 2.1 fait la synthèse des objectifs des systèmes de quatrième génération retenus par le Forum international Génération IV (GIF).

Les systèmes hybrides (*Accelerator Driven System – ADS*) ont suscité un regain d'intérêt au début des années 90, mais le niveau de conception détaillée qui permettrait de déboucher sur un système industriel n'a pas été atteint. Il s'agit de réacteurs fonctionnant en mode sous-critique, couplés à un accélérateur de protons. Le faisceau de protons génère, par réaction de spallation, des neutrons qui vont ensuite transmuter les éléments transuraniens présents dans le cœur. Bien que capables de transmuter de grandes quantités de TRU, et donc de prendre en charge des déchets de haute activité issus d'autres réacteurs, les systèmes hybrides ne font pas partie des concepts de quatrième génération que l'on a entrepris de mettre au point activement. À court ou à moyen terme, il semble peu probable qu'ils atteignent le stade de la maturité industrielle ou du déploiement commercial.

Tableau 2.1 Enjeux des systèmes nucléaires de la Génération IV

Durabilité	Assurer une production durable d'énergie à l'échelle mondiale, dans le respect des objectifs de pureté de l'air et mettre en place des systèmes qui utilisent efficacement le combustible à longue échéance. Réduire le plus possible la quantité de déchets nucléaires, les gérer et alléger notablement le fardeau de leur surveillance à long terme, et ainsi mieux protéger la santé du public et de l'environnement.
Compétitivité économique	Présenter un avantage évident par rapport aux autres sources d'énergie en termes de coût du cycle de vie. Présenter un niveau de risque financier comparable à celui des autres projets de production d'énergie.
Sûreté et fiabilité	Présenter d'excellentes caractéristiques de sûreté et de fiabilité. Présenter un très faible risque de fusion du cœur et un très faible niveau d'endommagement du cœur en cas d'accident. Supprimer toute nécessité de plan d'urgence hors site.
Résistance à la prolifération et protection physique	Veiller à faire de ces systèmes les moyens les moins intéressants de détourner ou de voler des matières utilisables dans des armes ; renforcer la protection physique contre les actes de terrorisme.

Source : NERAC/GIF, 2002.

2.2.3 Concepts de réacteurs appartenant aux générations III et III+

Tous les réacteurs des générations III et III+ sont à neutrons thermiques. Ils peuvent être divisés en deux groupes : les modèles déjà commercialisés et les concepts qui devraient l'être dans quelques années. Les réacteurs du premier groupe sont déjà construits, en construction ou commandés, ou en attente de certification. Les premières tranches équipées de réacteurs du second groupe sont aussi en préparation, mais à un stade moins avancé. La liste non exhaustive ci-après récapitule les principales caractéristiques des concepts pour lesquels il existe au moins un client avec un projet spécifique sur un site sélectionné.

La plupart des concepts décrits ici concernent des réacteurs de grande puissance (1 000 MWe au minimum). Divers constructeurs et organismes de R-D développent actuellement des modèles de réacteurs de moindre puissance (AIEA, 2006), comme le réacteur IRIS de Westinghouse et ses associés, mais ils n'ont pas encore trouvé de client, exception faite des deux réacteurs à haute température et refroidis au gaz en cours de développement en Chine et en Afrique du Sud (voir plus loin).

Les descriptions des concepts sont très brèves. Pour plus d'information, consulter les sites Internet et les publications énumérées dans les références en fin de chapitre et, en particulier, le document technique de l'AIEA qui fait le point sur les conceptions de REO avancées (AIEA, 2004).

Concepts commercialisés

L'ABWR (*Advanced Boiling Water Reactor*) est un réacteur à eau bouillante de 1 450 MWe mis au point par un consortium composé de General Electric, d'Hitachi et de Toshiba. Deux réacteurs de ce type ont déjà été construits au Japon, pour les tranches 6 et 7 de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa.

L'ABWR est conforme au cahier des charges des compagnies européennes, EUR (*European Utilities Requirements*) et certifié par la *Nuclear Regulatory Commission* des États-Unis (USNRC).

L'AES 92 (VVER-V392) est un réacteur à eau sous pression de 1 000 MWe de conception russe (VVER), commercialisé par Atomstroyexport (Fédération de Russie). Il a été présélectionné pour la centrale de Belene, en Bulgarie, actuellement à l'étude. L'AES92 est conforme au cahier des charges des compagnies européennes, EUR, mais n'est pas certifié par l'USNRC.

L'APWR (*Advanced Pressurised Water Reactor*) est un réacteur à eau sous pression de 1 532 MWe conçu par la société japonaise Mitsubishi Heavy Industries. La construction de deux réacteurs APWR est actuellement envisagée pour les tranches 3 et 4 de la centrale de Tsuruga. Une version américaine du concept, d'une puissance de 1 700 MWe, est en préparation. Aucun examen de conformité au cahier des charges EUR n'a été effectué, mais l'USNRC instruit actuellement le dossier de demande de certification de ce réacteur.

L'AP1000 est un réacteur à eau sous pression à deux boucles, d'environ 1 100 MWe, conçu par Westinghouse Electric Company. Il peut être chargé en combustible MOX. Quatre tranches AP1000 ont été commandées en Chine pour les sites de Sanmen et Haiyang. Les deux tranches de Sanmen sont en construction. L'AP1000 a jugé conforme aux spécifications du document EUR et certifié par l'USNRC.

L'EPR (*European Pressurised Reactor*) est un réacteur à eau sous pression de 1 600 MWe mis au point par AREVA. Il peut être chargé en combustible MOX. Deux tranches EPR sont en chantier, la première à Olkiluoto, en Finlande, et la deuxième à Flamanville, en France. La construction de deux autres tranches est prévue en Chine. L'EPR répond aux spécifications du document EUR. Une version destinée au marché américain, de 1 700 MWe, est cours d'élaboration et l'USNRC instruit actuellement le dossier de demande de certification.

L'ESBWR (*Economic Simplified Boiling Water Reactor*) est un réacteur à eau bouillante de 1 450 MWe mis au point par le consortium General Electric/Hitachi. Plusieurs compagnies d'électricité américaines ont déposé une demande de permis de construction et d'exploitation auprès de l'USNRC pour un total de six tranches réparties sur cinq sites. Aucun examen de conformité au cahier des charges EUR n'a été effectué, mais un dossier de demande de certification finale du concept et de certification de la filière a été déposé à l'USNRC à la mi-2005.

Concepts qui devraient être disponibles dans quelques années

L'ACR-1000 est une version évolutionnaire du concept de réacteur à eau lourde canadien CANDU produit par Énergie atomique du Canada limitée. Sa puissance est de 1 165 MWe. Les éléments combustibles sont placés à l'horizontale dans des tubes de force, ce qui permet de réduire le volume de la cuve sous pression. Contrairement aux précédents réacteurs CANDU, l'ACR-1000 est refroidi avec de l'eau ordinaire : il nécessite donc un combustible à base d'uranium enrichi, mais sa densité de puissance est nettement plus élevée. Le modérateur utilisé est toujours l'eau lourde.

L'APR-1400 est un réacteur à eau sous pression coréen de 1 400 MWe, dont la conception s'inspire du System 80+ de Combustion Engineering. Son développement est dirigé par la compagnie d'électricité coréenne *Korean Hydro and Nuclear Power Company* et ses composants sont mis au point par l'équipementier Doosan. À long terme, la conception de l'APR-1400 pourrait permettre des chargements en combustible MOX. Il est prévu que les tranches 3 et 4 de la centrale de Shin-Kori soient équipées de ce type de réacteur. Une version plus petite – l'APR-1000 – est actuellement en construction (tranches 1 et 2 de la centrale de Shin-Kori).

L'*HTR-PM* a été mis au point en Chine par l'Institut des technologies nucléaires et des nouvelles technologies de l'énergie, de l'Université de Tsinghua, à partir du concept allemand de réacteur à haute température à lit de boulets (Zuoyi Zhang *et al.*, 2007). Le cœur est composé de boulets de graphite de la taille d'une balle de tennis, contenant chacun environ 10 000 billes d' UO_2 enrobées, ce qui nécessite un uranium enrichi à plus de 6 %. La construction d'une tranche de démonstration à Shidaowan, dans la province chinoise du Shandong, a été approuvée fin 2005. Cette tranche comprendra deux réacteurs de 250 MWth chacun, couplés à une turbine à vapeur dont le rendement thermique prévu avoisine 40 %. La mise en service de la centrale est planifiée pour 2013.

Le *PBMR* s'appuie sur la technologie allemande de réacteur à haute température à lit de boulets, mais sa conception est plus avancée puisqu'il est couplé à une turbine à gaz à cycle direct et que son cœur est de configuration annulaire. Sa puissance est de 165 MWe. Il est prévu de construire une centrale de cette conception, avec plusieurs réacteurs (modules) partageant de nombreux services. L'entreprise sud-africaine *PBMR (Pty) Ltd.* a été créée en 2000 pour assurer ces travaux de développement. L'*USNRC* prépare actuellement la certification du concept (examen de la demande). Un prototype devrait entrer en service en 2014 sur le site de la centrale de Koeberg (Afrique du Sud) qui appartient à la compagnie d'électricité nationale *ESKOM*.

2.2.4 Concepts de réacteurs de quatrième génération

Le Forum international Génération IV a sélectionné six concepts de réacteurs pour lesquels il est prévu de poursuivre des travaux de recherche et développement (*NERAC/GIF*, 2002). Ces six concepts sont brièvement présentés sur le tableau 2.2 puis décrits dans les paragraphes qui suivent. Les dates mentionnées pour le déploiement commercial ont été fournies par les participants au *GIF* (*GIF*, 2008) et supposent que l'on atteigne les objectifs de R-D du *GIF* au cours des dix prochaines années.

Tableau 2.2 Panorama des systèmes de Génération IV

Concept	Spectre neutronique	Réfrigérant	Température (°C)	Cycle du combustible	Puissance (MWe)
VHTR (réacteur à très haute température)	thermique	hélium	900-1 000	ouvert/fermé	250-300
SFR (réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium)	rapide	sodium	550	fermé	30-150 ; 300-1 500 ; 1 000-2 000
SCWR (réacteur à eau supercritique)	thermique/ rapide	eau	510-625	ouvert/fermé	300-700 ; 1 000-1 500
GFR (réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz)	rapide	hélium	850	fermé	1 200
LFR (réacteur à neutrons rapides à caloporteur plomb)	rapide	plomb	480-800	fermé	20-180 ; 300-1 200 ; 600-1 000
MSR (réacteur à sels fondus)	thermique/ rapide	sels fondus (fluorures)	700-800	fermé	1 000

Source : *GIF*, 2008.

Les systèmes à neutrons rapides sont bien représentés parmi les concepts sélectionnés (voir ci-après), principalement en raison de la durabilité potentielle du système nucléaire si les réacteurs sont associés à un cycle du combustible fermé avec recyclage des actinides permettant de réduire le volume

et la radiotoxicité des déchets ultimes. Trois des concepts proposés dans de la feuille de route de Génération IV sont uniquement à spectre neutronique rapide : GFR refroidi à l'hélium, le SFR refroidi au sodium et le LFR refroidi au plomb. Deux autres concepts peuvent fonctionner avec des neutrons thermiques ou des neutrons rapides : le réacteur à sels fondus et le réacteur à eau supercritique.

La première raison de mettre au point des réacteurs à neutrons rapides est bien sûr l'objectif de durabilité fixé dans la feuille de route de Génération IV, qui suppose la possibilité de produire des matières fissiles et de transmuter les déchets en isotopes à vie plus courte. Le développement des SFR peut s'appuyer sur le retour d'expérience d'exploitation des réacteurs rapides de première génération qui ont été ou sont en service dans les pays participants. La mise au point des concepts à caloporteur gaz ou plomb, moins étudiés jusqu'à présent, se justifie par la volonté de s'affranchir du problème de la réactivité chimique importante du sodium. Dans tous les concepts de réacteurs rapides on prévoit des taux de combustion élevés ainsi que des variantes de combustibles contenant des actinides.

Réacteur à neutrons thermiques

Le réacteur à très haute température est une nouvelle étape de l'évolution des réacteurs à haute température. Il s'agit d'un réacteur thermique modéré au graphite et refroidi à l'hélium, dont la température en sortie de cœur dépasse 900 °C sachant que l'on cherche à atteindre 1 000 °C, soit une chaleur suffisante pour des procédés à haute température tels que la production thermochimique d'hydrogène. La puissance thermique de référence du réacteur est fixée à un niveau, actuellement estimé à environ 600 MWth, qui permet l'évacuation passive de la chaleur résiduelle. Le VHTR peut servir à la cogénération d'électricité et d'hydrogène ainsi qu'à la fourniture de chaleur industrielle. L'hydrogène peut être obtenu à partir de l'eau par des procédés thermochimiques, électrochimiques ou hybrides en produisant peu de CO₂. Dans un premier temps, le cycle du combustible sera ouvert et consommera de l'uranium faiblement enrichi (<20 % ²³⁵U), mais un cycle fermé sera évalué ainsi que d'autres cycles du combustible permettant d'exploiter le VHTR en symbiose avec d'autres réacteurs (en particulier des REO) dans le but de réduire les déchets. Le déploiement commercial du VHTR est prévu pour 2020.

Réacteurs à neutrons thermiques/rapides

Le réacteur à eau supercritique est un réacteur à haute température et haute pression, à cycle de conversion d'énergie direct, qui fonctionne au-delà du point critique thermodynamique (374 °C, 22,1 MPa) de l'eau, utilisée comme réfrigérant. L'emploi d'un réfrigérant à haute température et sans changement de phase permet d'augmenter le rendement thermodynamique et de simplifier les équipements, d'où un gain économique. De nombreuses options sont actuellement à l'étude : les spectres neutroniques rapide et thermique sont tous deux envisagés, ainsi que les deux configurations avec cuve sous pression ou tubes de force. La mise en service d'un réacteur de démonstration de 30 à 150 MWe est prévue à l'horizon 2020.

Le réacteur à sels fondus met à profit les caractéristiques très particulières des combustibles liquides. Il incinère efficacement les éléments transuraniens du combustible utilisé de REO, mais il peut également être utilisé comme surgénérateur à tous les niveaux du spectre neutronique, depuis le spectre thermique (avec un cycle thorium) au spectre rapide (avec un cycle uranium-plutonium). Qu'ils soient configurés en incinérateurs ou en surgénérateurs, les réacteurs à sels fondus paraissent très intéressants réduire les quantités de déchets nucléaires radiotoxiques.

Réacteurs à neutrons rapides

Le réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium permet d'exploiter un cœur de puissance volumique plus importante pour un volume de réfrigérant plus réduit. Il est associé à un cycle du

combustible fermé qui permet de régénérer du combustible et/ou d'incinérer les actinides. Sa configuration peut être de type piscine ou compact à boucles. Les puissances des réacteurs actuellement à l'étude s'échelonnent entre des niveaux faibles (réacteurs modulaires de 50 à 300 MWe) et élevés (jusqu'à 1 500 MWe). Les deux principales options retenues pour le recyclage du combustible sont le procédé aqueux avancé et le procédé pyrométallurgique. Plusieurs matériaux combustibles sont envisagés, les solutions privilégiées étant le mélange d'oxydes dans le cas du procédé aqueux avancé et le mélange d'alliages métalliques dans le cas du procédé pyrométallurgique. Étant donné l'important retour d'expérience accumulé dans plusieurs pays sur les réacteurs refroidis au sodium, le déploiement des SFR est prévu pour 2020.

Le réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz allie les avantages du spectre neutronique rapide à ceux du refroidissement par de l'hélium qui permet d'atteindre des températures élevées. Néanmoins, il nécessite le développement d'éléments combustibles réfractaires robustes et d'une architecture de sûreté adaptée. L'utilisation d'un combustible dense, par exemple de type carbure ou nitrure, garantit une performance satisfaisante en termes de production de plutonium et d'incinération des actinides. Un réacteur de démonstration nécessaire à la qualification des technologies clés pourrait être mis en service à l'horizon 2020.

Le réacteur à neutrons rapides à caloporteur plomb est caractérisé par un spectre neutronique rapide et un cycle du combustible fermé avec recyclage intégral des actinides, éventuellement dans des installations du cycle du combustible centrales ou régionales. Le réfrigérant peut être le plomb (option privilégiée) ou un eutectique plomb/bismuth. Le LFR peut fonctionner comme surgénérateur, comme incinérateur des actinides contenus dans le combustible usé si l'on emploie une matrice inerte ou comme surgénérateur/incinérateur avec des matrices thorium. Concernant la puissance, deux options sont considérées : un petit système transportable de 50 à 150 MWe possédant un cœur à très longue durée de vie, et un système moyen de 300 à 600 MWe. À long terme, un système beaucoup plus puissant, de 1 200 MWe, pourrait être envisagé. Le LFR pourrait être déployé d'ici 2025.

2.2.5 Installations du cycle du combustible nucléaire

L'évolution des technologies concerne à la fois les réacteurs et les installations du cycle du combustible, comme l'illustre la figure 2.5. L'évolution de l'aval du cycle et des technologies associées doit être cohérent et synchronisé avec celui des concepts de réacteurs et de leurs cycles du combustible (Giroux *et al.*, 2007).

Il existe trois voies de recyclage des actinides possibles :

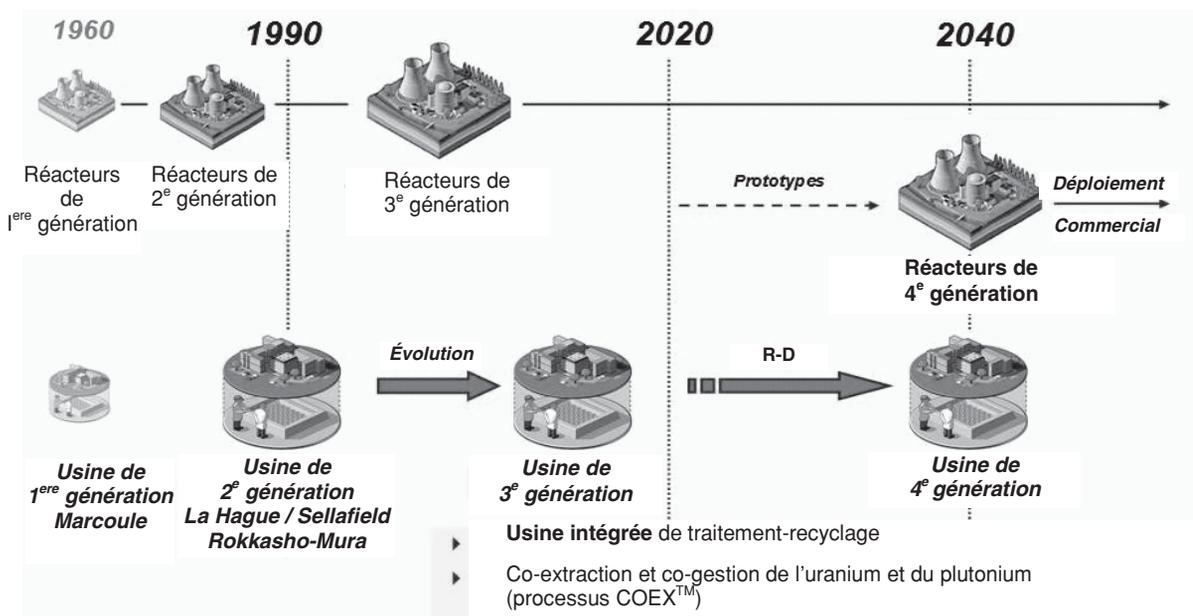
- recyclage de l'uranium et du plutonium, et vitrification et stockage définitif des actinides mineurs ;
- recyclage homogène des actinides mineurs ;
- recyclage hétérogène d'actinides mineurs à forte teneur (généralement 30 % voire plus).

Ces trois options nécessitent des procédés hydrométallurgiques ou pyrométallurgiques spécifiques. Les procédés hydrométallurgiques, qui peuvent traiter le combustible usé sous les formes UOX, MOX ou AM, sont plus aboutis que les procédés pyrométallurgiques, qui peuvent traiter le combustible à matrice inerte des systèmes hybrides.

Pour le recyclage de l'uranium et du plutonium, le principal procédé industriel utilisé aujourd'hui est le procédé PUREX. À l'avenir, il est prévu d'ouvrir une usine de traitement-recyclage intégrée où le plutonium pur ne serait pas isolé. Elle aurait une capacité de production supérieure et produirait du

MOX présentant d'excellentes performances dans les REO et les RNR grâce aux procédés COEX™ ou UREX+.

Figure 2.5 Évolution des systèmes nucléaires et des usines de retraitement du combustible



Source : AREVA.

En vue de leur recyclage hétérogène dans des RNR de quatrième génération, les actinides mineurs peuvent être séparés des radionucléides à vie longue par des procédés développés par optimisation des procédés DIAMEX-SANEX. Cette option peut être mise en œuvre en association avec le procédé COEX™. La faisabilité scientifique des procédés DIAMEX et SANEX a été démontrée en 2005 à l'échelle du laboratoire dans l'installation française ATALANTE.

On peut également opter pour la stratégie du recyclage homogène des actinides dans des RNR de quatrième génération. Il faut alors réaliser l'extraction groupée des actinides, au moyen du procédé GANEX, par exemple, qui s'inspire des procédés DIAMEX-SANEX et doit être testé sur solution réelle en 2008. La séparation pyrochimique est également une option.

Sur le long terme, l'objectif est de valider une technologie en vue du déploiement à l'échelle industrielle de RNR de quatrième génération à l'horizon 2040.

Références

AIEA (2007), *Energy, Electricity and Nuclear Power: Developments and Projections – 25 Years Past & Future*, Vienne, Autriche.

AIEA (2006), *Status of innovative small and medium sized reactor designs*, TECDOC-1485, Vienne, Autriche.

AIEA (2004), *Status of advanced light-water reactor designs*, TECDOC-1391, Vienne, Autriche.

AIE (2008), *Energy Technology Perspectives 2008 – Scenarios and Strategies to 2050, in support of the G8 Plan of Action*, OCDE, Paris, France.

GIEC (2000), *Scénarios d'émissions*, rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC (Résumé à l'intention des décideurs), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

GIF (2008), *Generation IV International Forum, Annual Report 2007*, OCDE, Paris, France.

Giroux, M. *et al.*, 2007, rapport national AIEA 2007, « The back-end of the fuel cycle in France: status and prospects », Marc Giroux, Jean-Michel Grygiel (AREVA-NC), Bernard Boullis, Michel Masson, François Storrer (CEA).

AEN (2008), *Perspectives de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris, France.

NERAC/GIF, (2002), *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, USDOE, Washington, DC, États-Unis. <http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>.

Petrunik, Ken, (2007), « Ready for the market », *Nuclear Engineering International*, octobre 2007, également disponible à l'adresse <http://www.aecl.ca/Assets/Publications/NEI-ACR-1000.pdf>.

Zuoyi Zhang et Yuliang Sun (2007), « Economic potential of modular reactor nuclear power plants based on the Chinese HTR-PM project », *Nuclear Engineering and Design*, volume 237, numéro 23, décembre 2007, pages 2265-2274.

Site Internet d'AREVA, <http://www.aveva-np.com/scripts/info/publigen/content/templates/show.asp?P=1655&L=US&SYNC=Y>

Site Internet d'European Utility Requirements, <http://www.europeanutilityrequirements.org>.

Site Internet de GE Power, page consacrée à l'ABWR, http://www.gepower.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/new_reactors/abwr.htm

Site Internet de GE Power, page consacrée à l'ESBWR, http://www.gepower.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/new_reactors/esbwr.htm

Site Internet de Mitsubishi Heavy Industries, http://www.mhi.co.jp/atom/hq/atome_e/apwr/index.html

Nuclear Engineering International, 6 novembre 2006.

Site Internet de Westinghouse Nuclear, <http://ap1000.westinghousenuclear.com/index.html>

Site Internet d'EACL, <http://www.aecl.ca/Assets/Publications/NEI-ACR-1000.pdf>

Site Internet de KHNP, *Advanced Power Reactor 1400*, <http://www.apr1400.com/>

Site Internet du projet de construction de la centrale nucléaire de Belene, <http://belene-npp.com/index.php?lang=2&pid=9>

Chapitre 3

PROMESSES ET DÉFIS DES SCÉNARIOS DE TRANSITION

D'après les scénarios présentés au chapitre 2, l'énergie nucléaire devrait continuer d'occuper une place importante dans le bouquet énergétique mondial au 21^e siècle. La croissance de la demande dans les pays en développement, les préoccupations concernant la sécurité d'approvisionnement dans les pays de l'OCDE, enfin et surtout la prise de conscience qu'il est impératif de réduire le risque de changement climatique à l'échelle planétaire devraient fortement inciter les décideurs à considérer l'option nucléaire.

En cas de relance des programmes nucléaires, la priorité absolue sera indubitablement la durabilité de la production d'énergie, les autres objectifs étant la gestion écologique des déchets, la diversité des approvisionnements, la non-prolifération des armes nucléaires, la compétitivité économique et l'adhésion du public. Dans ce contexte, la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides doit avant tout viser à améliorer les performances des systèmes nucléaires à l'échelle mondiale dans une perspective de long terme.

Pour définir la politique à suivre, il est important de bien connaître les possibilités des systèmes à neutrons rapides ainsi que les difficultés que présenteront les scénarios de transition. Les systèmes nucléaires formés par des réacteurs rapides et un cycle du combustible fermé sont un moyen de réaliser les objectifs d'une politique énergétique. C'est pourquoi, les types de systèmes à sélectionner et le moment où les déployer dans le cadre des scénarios de transition doivent être subordonnés, et adaptés, aux objectifs de la politique.

Les incitations et les obstacles à la mise en œuvre de programmes de transition seront différents selon les pays. Dans chaque pays ou région, les objectifs et la pertinence du déploiement de systèmes nucléaires à réacteurs rapides et cycle fermé évolueront à mesure que les programmes nucléaires seront mis au point et/ou abandonnés. Dans certains cas, la voie privilégiée restera celle des réacteurs thermiques, tandis que dans d'autres, il sera préférable de déployer au plus tôt des réacteurs rapides.

Des analyses multicritères seront nécessaires pour évaluer les avantages et les inconvénients des divers scénarios de transition possibles. À chaque problème conviendront de multiples solutions qui devront être hiérarchisées selon les priorités des décideurs et les capacités du pays en termes de ressources naturelles, d'infrastructures et de technologies.

3.1 Contexte

Au tout début du développement des technologies nucléaires, il semblait judicieux d'exploiter le plutonium que l'on peut produire à partir de l'uranium dans le cœur de réacteurs pour satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité. Grâce au recyclage du plutonium dans un parc de réacteurs rapides « surgénérateurs », on pensait pouvoir très fortement réduire les activités d'extraction et

d'enrichissement de l'uranium et, dans le même temps, diminuer nettement la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles.

Ces attentes ont débouché, dans les années 50 et 60, sur la mise en œuvre de deux programmes de R-D distincts mais apparentés : d'une part, la séparation, par retraitement du combustible usé, du plutonium formé dans les réacteurs thermiques et, d'autre part, la conception et le développement de réacteurs à neutrons rapides.

Bien que la faisabilité commerciale des deux technologies ait été prouvée, leur évolution industrielle ultérieure n'a pas emprunté des voies parallèles. Par conséquent, plusieurs pays disposent aujourd'hui d'usines de retraitement du combustible usé des réacteurs à eau ordinaire et du plutonium a été produit en quantité non négligeable, tandis que très peu des réacteurs rapides ont été construits et exploités. Les deux raisons habituellement citées pour expliquer le retard de développement des RNR sont d'abord le faible prix de l'uranium naturel, qui a porté un coup à la compétitivité des réacteurs rapides, plus coûteux en capital que les réacteurs thermiques, et ensuite les problèmes techniques et politiques rencontrés avec les RNR à caloporteur sodium.

Le développement des réacteurs rapides, pronostiqué dans les années 80, s'est également heurté d'autres problèmes parmi lesquels une croissance de la demande énergétique plus faible que prévu et les répercussions de l'accident de Tchernobyl. Il était prévu de construire des réacteurs rapides en Europe de l'Ouest (EFR) et en Russie (BN-800) mais les projets ont été abandonnés à cause de la faiblesse de la demande d'électricité.

Dans ce contexte, plusieurs pays ont décidé non pas de retraiter le combustible usé, mais de l'entreposer avant de le stocker avec d'autres DHA dans des dépôts en couches géologiques profondes. Ces pays ont développé des stratégies et des concepts de gestion du combustible usé qui visent, en attendant son stockage définitif, à le maintenir isolé de la biosphère pendant de longues périodes et à protéger efficacement la santé des personnes et l'environnement.

Dans la plupart des cas, les éléments combustibles sont placés dans des conteneurs métalliques composés de matériaux hautement résistants à la dégradation à long terme dans des conditions spécifiques données. Ces conteneurs doivent ensuite être stockés dans un dépôt central en couches géologiques profondes dont le substratum a été jugé adéquat. L'un des concepts, développé entre autres par exemple par l'organisme de recherche suédois (SKB, 2003), prévoit également d'enrober chaque conteneur dans de l'argile, de la bentonite ou un matériau similaire, afin d'éviter tout contact physique entre le combustible usé et le milieu visqueux sur le site sélectionné.

Les partisans de la stratégie du stockage direct sont le plus souvent des petits pays, dotés de quelques centrales nucléaires, comme la Suède et la Finlande, mais on y retrouve aussi un pays tel que les États-Unis, qui possède plus d'une centaine de tranches nucléaires et qui, encore récemment, n'appliquait que cette seule stratégie (USDOE, 2008). Le choix d'un cycle du combustible ouvert ou fermé a été motivé par un large éventail de critères sociopolitiques, techniques et économiques.

À l'origine, la stratégie du retraitement visait à récupérer les matières fissiles (^{235}U et ^{239}Pu principalement) du combustible usé des réacteurs thermiques pour les utiliser dans un parc de réacteurs rapides surgénérateurs. Comme on prévoyait un déploiement à grande échelle des systèmes nucléaires, on a élaboré des plans pour utiliser des mélanges de plutonium et d'uranium (naturel ou appauvri) dans les RNR. Différents types de combustibles ont été étudiés (oxydes, métalliques, nitrures et carbures sous forme de pastilles enrobées dans une gaine métallique) et tous ont fait l'objet d'importants efforts de recherche.

Avec l'arrêt prématuré de presque tous les réacteurs rapides, la plupart des pays engagés sur la voie du retraitement ont choisi de recycler le plutonium dans les réacteurs thermiques. En s'appuyant sur les résultats des recherches consacrées aux combustibles des RNR, on a pu développer des combustibles à mélange d'oxydes pour les réacteurs à eau ordinaire, ce qui a permis de réduire de quelque 10 % la consommation d'uranium naturel. Par ailleurs, un stock toujours croissant de plutonium civil séparé a été constitué. Il est le plus souvent entreposé dans des installations en surface dédiées, sur les sites des usines de retraitement ou de fabrication de combustible.

Il existe actuellement trois usines de fabrication de combustible MOX à l'échelle industrielle en Europe. Ce combustible MOX est utilisé dans un petit nombre de réacteurs à eau ordinaire de rares pays. L'Allemagne, la France et la Suisse sont les seuls pays à disposer d'un retour d'expérience industrielle de l'utilisation de MOX dans les REO, toujours sur des cœurs partiellement chargés en MOX. Le Japon est en train de passer d'un programme d'utilisation de MOX fabriqué en Europe à un programme de retraitement et de fabrication de MOX sur le territoire national.

La plupart des réacteurs qui brûlent du combustible MOX sont chargés à 70 % d'UO₂ standard et à 30 % de MOX. La fraction de MOX dans le cœur est limitée par l'altération des propriétés neutroniques que provoque la teneur en plutonium plus élevée : un cœur partiellement chargé en MOX a un comportement global différent de celui d'un cœur entièrement chargé en UO₂ (or, tous les REO ont été conçus à l'origine pour des cœurs uniquement chargés en UO₂).

Du point de vue de la durabilité, de l'efficacité d'utilisation des ressources et de la gestion des actinides, les cycles du combustible actuels fondés sur des chargements partiels en MOX sont peu satisfaisants puisqu'ils ne permettent pas le multirecyclage en continu dans les REO. Comme la proportion de combustible à mélange d'oxydes dans le cœur des réacteurs en exploitation est en pratique limitée à un tiers, le rapport entre les quantités de plutonium chargées et déchargées est proche de 1, de sorte qu'il n'y a pas de consommation nette de plutonium.

Du fait de l'utilisation de combustible MOX dans les réacteurs à eau ordinaire, les quantités d'actinides mineurs (Np, Am, et en particulier Cm) présentes dans le combustible utilisé sont plus importantes. Le monorecyclage du plutonium dans les REO, tel qu'il est pratiqué aujourd'hui, c'est-à-dire sans retraitement ultérieur du combustible MOX ni recyclage des actinides dans des RNR, augmente de fait la teneur en actinides mineurs du combustible utilisé stocké dans les dépôts.

Cette stratégie est donc loin d'optimiser l'utilisation du plutonium. Elle ne sert qu'à empêcher l'accumulation de nouveaux stocks de plutonium séparé, sans pour autant réduire les stocks existants. C'est pourquoi, les dix à vingt dernières années ont vu la mise au point d'un vaste programme de recherches diversifiées destinées à améliorer l'utilisation des stocks de plutonium dans les REO.

Au cours des dix dernières années, d'autres options ont également été proposées concernant les combustibles à mélange d'oxydes : elles vont de l'emploi d'uranium enrichi dans le MOX à l'absence complète d'uranium dans le MOX. Cette dernière solution pourrait être mise en œuvre grâce à l'utilisation d'oxyde de thorium (²³²Th), fertile et non fissile, ou d'une matrice dite inerte telle que l'oxyde de zirconium. Des travaux de recherche ont été effectués pour étudier la faisabilité de ces solutions.

3.2 Possibilités offertes par les scénarios de transition

Les décideurs évalueront les possibilités offertes par les scénarios de transition de manière holistique, en considérant à la fois l'efficacité d'exploitation des ressources, la sécurité d'appro-

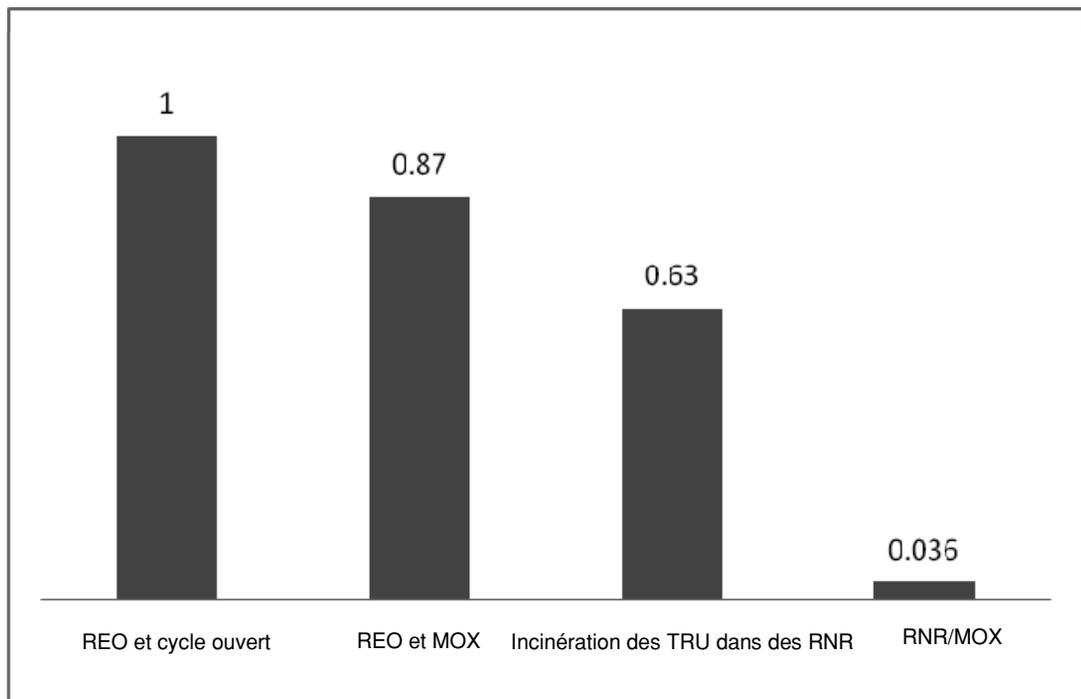
visionnement en combustible, la gestion des déchets, la résistance à la prolifération, la protection physique, la compétitivité économique et les performances de sûreté. L'importance de chaque facteur varie d'un pays à l'autre et dépend du contexte national/régional mais aussi des objectifs spécifiques de la politique énergétique.

Efficacité d'utilisation des ressources naturelles

Dans les réacteurs thermiques de la génération présente, c'est-à-dire les réacteurs à eau, seule une très faible fraction du potentiel énergétique de l'uranium naturel est exploitée pour produire de l'électricité. Dans les réacteurs thermiques actuels, 99 % du contenu énergétique de l'uranium sont inutilisés. Le combustible usé déchargé de ces réacteurs contient de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs qui peuvent être recyclés dans des réacteurs thermiques ou rapides pour produire davantage d'énergie.

Le recyclage de l'uranium, du plutonium et des actinides mineurs présente l'avantage de prolonger la durée de vie des ressources en uranium naturel à des coûts relativement faibles. Les réacteurs rapides exploités en mode surgénérateur peuvent multiplier l'énergie extraite de l'uranium naturel par 50, voire beaucoup plus, selon la cadence d'introduction, le facteur de conversion, l'efficacité des procédés de retraitement et de recyclage et les pertes engendrées par ces procédés.

Figure 3.1 Estimation des besoins en uranium naturel avec différents modes de recyclage



Source : AEN, 2006.

L'étude réalisée par l'AEN sur les cycles du combustible avancés (AEN, 2006) fournit des exemples d'estimations quantitatives des réductions des besoins en uranium que l'on obtiendrait si l'on mettait en service des systèmes à réacteurs rapides. Les résultats, résumés à la figure 3.1, correspondent aux besoins en uranium à l'équilibre et supposent que les technologies de retraitement et de fabrication de combustible sont au point et génèrent des pertes très faibles. On notera que ces économies ne seront possibles qu'après plusieurs décennies de transition, et sous réserve que les

performances des réacteurs rapides et des procédés des cycles du combustible avancés atteignent les niveaux actuellement escomptés.

Sécurité d'approvisionnement

Une meilleure exploitation du potentiel énergétique de l'uranium entraîne une diminution de la demande de minerai d'uranium et donc un renforcement de la sécurité d'approvisionnement en combustible pour tous les utilisateurs de l'énergie nucléaire. En outre, l'impact environnemental de l'extraction et du traitement de l'uranium, et notamment l'accumulation de résidus d'extraction, est réduit.

Les systèmes nucléaires à surgénérateurs rapides ont été très tôt considérés par certains pays comme la France et le Japon qui disposent de très peu de ressources en uranium et en combustibles fossiles comme un moyen de gagner en indépendance énergétique à long terme.

À longue échéance, des systèmes nucléaires à base de surgénérateurs rapides, aux facteurs de conversion bien adaptés, se comporteraient comme une source d'énergie presque renouvelable puisque les quantités de ^{238}U requises pourraient être fournies par les stocks d'uranium appauvri et d'uranium retraité pendant de nombreuses décennies.

Gestion des déchets radioactifs

Le stockage des déchets de haute activité est l'une des premières sources d'inquiétude de la société civile à propos de l'énergie nucléaire. C'est pourquoi la mise en œuvre d'une approche fiable dans ce domaine est une priorité pour les décideurs. La transition vers les réacteurs rapides offre l'occasion de régler certains problèmes en aval du cycle du combustible et, en particulier, de faciliter la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables dont font partie l'uranium, le plutonium et les actinides mineurs.

Plusieurs solutions techniques existent déjà pour l'aval du cycle du combustible et la gestion des déchets radioactifs et bien d'autres font actuellement l'objet de programmes de recherche et développement menés en continu et à grande échelle. Cependant, dans la plupart des pays, il est difficile de passer à l'étape de la mise en œuvre à l'échelle industrielle et commerciale, en raison des réticences du public et de la durée des procédures réglementaires.

C'est pourquoi, bien que les volumes de déchets de haute activité produits par les réacteurs de puissance soient inférieurs à ceux produits par la plupart des autres types de centrales électriques, l'un des principaux objectifs des politiques nucléaires de la majorité des pays membres de l'OCDE est de limiter le nombre et la taille des dépôts géologiques de stockage des déchets. Pour les pays décidés à abandonner le nucléaire, comme pour les pays souhaitant, au contraire, relancer leurs programmes, il est indispensable de trouver des moyens de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets radioactifs si la durabilité à long terme de l'option nucléaire doit être préservée.

Les déchets des réacteurs de puissance et des activités du cycle du combustible (dont extraction de l'uranium) sont, pour une large part, gérés à l'échelle industrielle et stockés de façon sûre dans des dépôts de déchets de faible et moyenne activité. Seuls quelques pourcents en volume de ces déchets, qui contiennent des isotopes de haute activité à vie longue, doivent être isolés de la biosphère pour de très longues périodes. Une forte proportion de ces isotopes deviennent des déchets de haute activité dans les systèmes nucléaires à réacteurs thermiques et cycle ouvert, alors qu'ils constitueraient une source d'énergie dans des systèmes à RNR et cycle fermé avec retraitement du combustible usé et recyclage des matières fissiles.

Dans une perspective de développement durable, il est extrêmement intéressant de réduire les quantités d'actinides dans les déchets de haute activité destinés à être stockés dans des dépôts géologiques. La meilleure utilisation du potentiel énergétique de l'uranium naturel permet de réduire les besoins en uranium frais et donc l'impact environnemental des activités d'extraction et de traitement de l'uranium. En outre, elle écourte le temps pendant lequel les déchets restent hautement radioactifs, et donc la période de surveillance et le fardeau imposé aux générations futures.

Le stockage direct du combustible usé, qui constitue aujourd'hui, pour la plupart des compagnies d'électricité, l'option la plus techniquement mature et la plus concurrentielle, conduit à négliger une bonne partie du contenu énergétique de l'uranium et génère d'importants volumes de déchets hautement radiotoxiques. Par exemple, au rythme où l'on décharge actuellement le combustible usé des réacteurs nucléaires exploités aux États-Unis, il faudrait disposer, tous les 20 à 30 ans, d'une nouvelle capacité de stockage égale à la capacité légale actuelle (63 000 tonnes) du dépôt géologique américain de Yucca Mountain consacré au combustible usé des réacteurs civils. Même si des études récentes indiquent que Yucca Mountain pourrait recevoir une quantité de déchets bien plus importante, l'accumulation de combustible usé finira par devenir un problème si le cycle du combustible reste ouvert.

3.3 Problèmes posés par les scénarios de transition

Les scénarios de transition soulèvent un certain nombre de problèmes qu'il faudra résoudre en temps voulu si l'on veut que les programmes prévus soient appliqués avec succès. La principale difficulté, pour les décideurs, est d'évaluer les multiples aspects des scénarios de transition dans leur globalité, en prenant en compte les incertitudes concernant les performances techniques et économiques des systèmes avancés mais aussi l'évolution future de l'offre et de la demande d'énergie.

Les analystes auront alors un rôle essentiel à jouer. À partir de modélisations et d'études de sensibilité, ils devront fournir aux décideurs des résultats fiables qui mettent en évidence les avantages et les inconvénients des différents scénarios dans une approche multicritères.

Le parc électronucléaire actuellement exploité comprend surtout des réacteurs à eau. Le déploiement de RNR nécessitera une longue période de transition au cours de laquelle les deux filières de réacteurs seront simultanément en service. La durée de la période de transition et l'évolution de la composition du parc au cours de cette période dépendront de la stratégie adoptée.

Les principaux problèmes que posent les scénarios de transition sont leur durée et les infrastructures dont ils ont besoin. Pour les décideurs et la société civile, il est difficile d'évaluer les risques et les avantages de programmes prévus pour durer plusieurs décennies avant de parvenir à maturité et susceptibles de se terminer dans un siècle. C'est pourquoi l'application de certains scénarios de transition mettant en jeu la séparation-transmutation des actinides mineurs risque d'être ardue, à supposer qu'elle soit possible : il faut compter au moins un siècle pour obtenir des résultats tangibles, or de nombreuses parties prenantes ont du mal à appréhender les bénéfices prévus à très long terme et/ou à s'y intéresser.

Gestion des matières fissiles

Les exigences de retraitement et de séparation des matières fissiles dépendent des objectifs des scénarios de transition envisagés et du fonctionnement des réacteurs et des installations du cycle du combustible dont on dispose pour mettre en œuvre ces scénarios. Étant donné la durée d'au moins plusieurs décennies de la transition, il est indispensable d'estimer l'évolution dynamique des flux massiques dans les systèmes afin de vérifier que l'offre de matières fissiles suffira à alimenter l'ensemble des réacteurs en service.

Tout le problème est de trouver le juste équilibre entre les objectifs à court terme et les ambitions à long terme. Par exemple, le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau est une option intéressante à court et à moyen terme, à condition que l'on dispose d'un stock suffisant de plutonium pour alimenter les réacteurs rapides lorsqu'ils seront mis en service.

Délais requis pour réduire les stocks d'éléments transuraniens

Avec ou sans transition, l'industrie nucléaire se caractérise par ses longs délais de mise en production. De la décision à la première fourniture d'électricité au réseau, il faut environ dix ans pour mettre en service une tranche nucléaire, et la durée d'exploitation des centrales nucléaires modernes est de plus de 50 ans. Or, l'élaboration et l'application de scénarios de transition nécessite de planifier les opérations à plus longue échéance encore.

Compte tenu du nombre et de l'âge des tranches nucléaires actuelles, la plupart des scénarios envisagés prévoient une période de transition de plus de 50 ans pendant laquelle des réacteurs thermiques et rapides seraient exploités en symbiose. Les calendriers établis pour atteindre les objectifs finals, par exemple l'élimination de tous les actinides ou le déploiement d'un parc de RNR auto-suffisant, doivent donc intégrer et refléter ces très longs délais.

Infrastructures

La complexité des systèmes nucléaires en période de transition nécessitera probablement des infrastructures plus sophistiquées que celles dont il faut s'équiper pour un parc homogène de réacteurs et d'installations du cycle de combustible. Si l'adaptation du cadre législatif et réglementaire général ne devrait pas poser de problème dans les pays où des centrales et d'autres installations nucléaires sont déjà en service, il faudra en revanche examiner avec attention les questions des moyens de recherche et développement, des capacités industrielles et des ressources humaines pendant l'élaboration et la mise en œuvre des scénarios de transition.

Capacités industrielles

L'adaptation des capacités industrielles à la demande en période de transition pose un problème car certaines des structures requises, qu'il s'agisse de centrales ou d'installations du cycle du combustible, pourraient se situer en deçà de l'optimum en termes de taille et de durée de vie si l'on considère l'évolution dynamique du parc de réacteurs. Dans de telles conditions, il sera difficile de convaincre les acteurs économiques, les investisseurs et les exploitants de centrales de concevoir, développer et mettre en service l'ensemble des installations requises pour mettre en place les scénarios de transition.

En outre, s'il y a trop peu d'installations et de réacteurs de chaque type, et qu'ils sont de trop petite taille, les coûts et donc les prix des services du cycle du combustible et de la production d'électricité pourrait augmenter, faute d'économie d'échelle, allant parfois jusqu'à compromettre la faisabilité économique de certains scénarios de transition. Pour atteindre le volume de demande requis et réduire les risques économiques propres aux systèmes innovants qui doivent être amortis sur une durée de transition relativement courte, la coopération internationale est un outil efficace. Cependant, elle nécessite d'établir des marchés mondiaux dotés de suffisamment de protections pour permettre les échanges de produits et services entre pays tout en évitant les risques de prolifération des armes nucléaires.

Les pays dotés d'un petit nombre de réacteurs et d'installations du cycle pourraient avoir des difficultés à déployer les capacités industrielles nécessitées par des programmes de transition reposant sur un approvisionnement domestique en services du cycle du combustible. Dans ces pays, il pourrait

être plus réaliste de conserver les systèmes actuels à réacteurs thermiques et cycle ouvert. Lorsque les programmes nucléaires sont modestes, les quantités cumulées de combustible usé à stocker en dépôt géologique sont plus faibles et il est plus facile de trouver un site de stockage approprié ; *a contrario*, la fermeture du cycle du combustible nécessite la construction de plusieurs petites installations du cycle à la viabilité économique incertaine. La coopération internationale, par exemple la création d'installations régionales, pourrait doter ces pays des moyens de mettre en œuvre une stratégie de transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides. Néanmoins, au delà de la construction de capacités industrielles, cette approche exigerait la mise au point de cadres législatifs et réglementaires adaptés.

Perception de la société, participation

Dans la société civile, la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides ne devrait pas provoquer d'autres réactions que la réticence habituelle face à l'innovation et aux systèmes avancés qui n'ont pas fait leurs preuves. Cependant, comme on l'a vu, il pourrait être difficile d'expliquer la complexité des systèmes à construire et à exploiter, ainsi que les échéances à considérer pour atteindre les objectifs des scénarios de transition.

Concernant la résistance à la prolifération et la protection physique, rien ne prouve que les systèmes RNR présentent plus – ou moins – de risques que les systèmes à réacteurs thermiques. Le régime international des garanties s'est avéré efficace et il est déjà adapté aux cycles du combustible fermés puisque certains pays exploitent des installations de retraitement et de fabrication de combustible MOX.

Politiques publiques

Tout pays qui souhaite passer sans problème des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides doit se souvenir que la stabilité de sa politique énergétique, et notamment de sa politique nucléaire, est indispensable. Pour adapter les capacités industrielles à la construction et à l'exploitation des nouveaux réacteurs et installations du cycle du combustible, il faut consentir d'importants investissements en capital et en ressources humaines, dont les acteurs économiques et la société civile ne recueilleront les bénéfices que longtemps après.

Les régimes réglementaires et les procédures d'autorisation, ainsi que les politiques fiscales appliquées aux produits de l'énergie et/ou aux émissions de carbone, doivent donc être stables et prévisibles pour que les investisseurs soient incités à financer des projets à long terme très coûteux en capital avec de très longs délais de retour sur investissement.

Références

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

SKB (2003), *Deep repository for spent nuclear fuel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company*, Stockholm, Suède.

USDOE (2008), *General Information, Yucca Mountain Repository Licence Application*, Washington, DC, États-Unis.

Chapitre 4

CONSIDÉRATIONS STRATÉGIQUES

Lorsqu'ils évaluent les différentes voies de développement à long terme de l'énergie nucléaire, les décideurs doivent tenir compte des besoins en ressources humaines, matières premières, services, R-D et installations industrielles associés à chaque option considérée. La transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides pose des problèmes de stratégie qui doivent être identifiées dès le début de la conception des scénarios. Ces problèmes doivent être analysés à toutes les étapes de la période de transition et lorsque le développement du parc de réacteurs et d'installations du cycle atteint l'objectif politique visé. Le présent chapitre passe en revue les points essentiels qui nécessitent une réflexion puis conclut sur les meilleures approches pour décider de s'engager ou non sur la voie de la transition et, si oui, de s'y engager avec succès. Il donne également un bref aperçu des initiatives internationales entreprises dans le domaine, en insistant sur leur capacité de faciliter la mise en œuvre des scénarios de transition.

4.1 Initiatives intergouvernementales

La coopération internationale s'est révélée indispensable à la mise au point des applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Elle sera une condition préalable au succès futur du déploiement des systèmes nucléaires, en particulier de la transition vers des réacteurs rapides associés à des cycles fermés. Plusieurs initiatives internationales récentes ont pour but d'examiner certains aspects techniques et/ou stratégiques de la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides.

Quand il s'agit d'étudier les aspects stratégiques des scénarios de transition, les projets de coopération internationale pour gérer le combustible nucléaire de façon à garantir la sécurité d'approvisionnement, la résistance à la prolifération et la compétitivité économique, revêtent un intérêt particulier. Cinq de ces projets sont passés en revue dans cette section, mais d'autres ont été proposés par divers pays et organisations (CRS, 2008).

Dans un rapport publié en 2005 (AIEA, 2005), un groupe d'experts de l'AIEA propose de créer une banque de combustible, de convertir des installations du cycle du combustible actuelles en installations multinationales et de créer des installations détenues et gérées conjointement par plusieurs pays. L'objectif de cette proposition est d'identifier des approches multilatérales permettant de renforcer la résistance à la prolifération sans perturber les mécanismes de marché dans le secteur du combustible nucléaire. En créant des installations multinationales, il serait possible, d'une part, d'augmenter la viabilité économique des cycles du combustible avancés et, d'autre part, de bénéficier d'économies d'échelle, même si les installations ne doivent être exploitées que pendant la période transitoire.

En janvier 2006, le Président russe a annoncé qu'il souhaitait que soient ouverts en Russie des centres internationaux de services du cycle du combustible à gestion commerciale fournissant des services d'enrichissement, des enseignements et des formations, et des services de gestion du combustible usé. Cette initiative permettrait à certains pays de ne pas avoir à créer les infrastructures

industrielles indispensables à la mise en place des scénarios de transition, même dans le cas d'un large déploiement de systèmes nucléaires à l'échelle du globe. La première étape de cette initiative, à savoir le projet pilote de création d'un centre international d'enrichissement de l'uranium à Angarsk, est en cours de réalisation. L'ouverture d'un centre international de retraitement du combustible est également envisagée dans le cadre des stratégies visant à fermer le cycle du combustible.

En 2006, constatant que le déploiement des futurs systèmes nucléaires serait probablement mondial et qu'il raviverait les inquiétudes concernant la destinée du combustible usé et la prolifération des technologies de fabrication de matières nucléaires spéciales (USDOE, 2006), le ministère américain de l'Énergie a créé le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP). Ce partenariat a pour ambition de fournir tous les services de l'amont et de l'aval du cycle aux pays qui souhaitent recourir à l'énergie nucléaire sans pour autant créer leurs propres installations du cycle du combustible.

Plus spécifiquement, la déclaration de principes du GNEP énonce, en ce qui concerne les scénarios de transition, les objectifs suivants :

- « Augmenter la puissance nucléaire installée pour répondre à la croissance de la demande énergétique de façon durable, tout en garantissant la sûreté d'exploitation des centrales et des centres de gestion de déchets.
- En coopération avec l'AIEA, continuer de renforcer le système de garanties nucléaires pour assurer une surveillance efficace et efficiente des matières et des installations nucléaires, de telle manière que les systèmes nucléaires ne puissent être utilisés qu'à des fins pacifiques.
- Mettre en place des structures d'approvisionnement internationales [...] qui permettent [...] de favoriser le développement et de lutter contre la prolifération, en créant une alternative viable à l'acquisition de technologies du cycle du combustible sensibles.
- Mettre au point, démontrer la faisabilité et, en temps voulu, déployer des réacteurs rapides avancés qui brûlent les éléments transuraniens du combustible usé recyclé.
- Mettre au point et démontrer la faisabilité de technologies avancées, notamment de recyclage du combustible usé [...], dans la perspective à long terme d'arrêter la séparation du plutonium et, en définitive, d'éliminer les stocks de plutonium civil séparé [...]. »

Deux autres initiatives internationales concernent les scénarios de transition, bien que leur champ d'étude soit plus large : le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible innovants (INPRO) et le Forum international Génération IV (GIF).

L'AIEA a lancé le Projet INPRO en 2001, sur la base d'une résolution de sa Conférence générale de 2000. Ce projet réunit une trentaine d'États membres de l'AIEA et vise avant tout à favoriser une utilisation des technologies nucléaires qui soit sûre, durable, économique, résistante à la prolifération et capable de satisfaire les besoins énergétiques du 21^e siècle. Il doit mettre en relation les détenteurs de technologies et les utilisateurs, de sorte qu'ils collaborent aux initiatives internationales et nationales nécessaires pour parvenir aux innovations souhaitées des réacteurs et cycles du combustible.

Les missions très diverses du projet INPRO consistent notamment à analyser le développement durable de l'énergie nucléaire, à faciliter la coopération internationale en vue du déploiement de nouveaux systèmes nucléaires, à satisfaire les besoins des pays en développement intéressés par les nouveaux systèmes nucléaires et à mettre au point des méthodologies d'évaluation des nouveaux systèmes nucléaires. Le projet INPRO a donné naissance à certains projets de collaboration tels que GAINS (voir chapitre 1), dont le but est d'étudier les scénarios de transition et d'identifier les synergies internationales qui faciliteraient leur mise en œuvre.

Réunissant onze pays et Euratom, GIF a pour objectif de favoriser la R-D sur les systèmes nucléaires avancés. La plupart des systèmes sélectionnés par GIF pour des travaux de R-D reposent sur des réacteurs rapides avec un cycle du combustible fermé (voir chapitre 2). L'analyse dynamique des scénarios n'entre pas dans le cadre des activités de GIF, mais les efforts de R-D prévus devraient permettre d'accroître le niveau de développement technologique des réacteurs rapides et des autres systèmes avancés.

4.2 Niveau de développement technologique et facteurs industriels

L'utilisation de matières fissiles recyclées, notamment dans des surgénérateurs rapides, aura pour effet de renforcer la sécurité d'approvisionnement, en combustible nucléaire en particulier et en énergie en général. Toutefois, il convient de prévoir les volumes de matières fissiles et de services du cycle du combustible qui seront nécessaires pendant la période de transition, et à quelle échéance, afin de mettre en service en temps voulu les capacités industrielles indispensables. Ceci exige une planification à long terme qui tienne compte de l'évolution avec le temps de la composition des parcs de réacteurs, des caractéristiques des systèmes nucléaires successivement déployés, et de la demande à chaque étape du cycle du combustible, des mines aux dépôts de stockage des déchets.

En vue de remplacer les réacteurs thermiques par des réacteurs rapides associés à un cycle fermé, il faut s'engager dans la R-D pour concevoir et développer les nouveaux systèmes et ensuite investir dans les infrastructures industrielles nécessaires à leur déploiement. Tous les pays qui souhaitent exploiter des réacteurs rapides doivent construire ou adapter des capacités industrielles à cet effet. Il leur faut également disposer de nouvelles usines de retraitement du combustible usé et de recyclage du plutonium, de l'uranium et des actinides mineurs ainsi que des dépôts de stockage définitif des déchets de haute activité.

À titre d'exemple, on estime entre 10 000 et 25 000 tonnes par an de combustible UOX usé la capacité de recyclage globale dont il faudrait disposer pour pouvoir fermer le cycle du combustible et déployer, chaque année à partir de 2040, des réacteurs rapides d'une puissance comprise entre 5 et 15 GWe. Bien que cet objectif ne soit pas un problème à l'échelle mondiale, les pays dotés d'infrastructures nucléaires limitées et/ou pour qui l'énergie nucléaire ne représente qu'une énergie d'appoint pourraient ne pas vouloir s'engager dans la construction d'installations nationales de retraitement ou de recyclage.

4.2.1 Amont du cycle du combustible

Approvisionnement en uranium

La sécurité de l'approvisionnement en uranium ne devrait poser de problème majeur ni à court terme, ni à moyen terme (AEN, 2008a). En revanche, la consommation totale d'uranium pourrait devenir substantielle d'ici 2050 si des systèmes nucléaires avancés ne sont pas progressivement déployés. En outre, dans une perspective de développement durable holistique et de long terme, une gestion efficace des ressources naturelles doit intégrer des solutions de recyclage.

En 2007, la production mondiale d'uranium avoisinait 43 000 tonnes, soit beaucoup moins que les volumes nécessaires au fonctionnement des réacteurs, estimés à 69 000 t d'U, mais l'offre était suffisante grâce aux sources secondaires telles que les matières d'origine militaire et les stocks. La capacité de production annuelle, de quelque 55 000 t d'U en 2007, devrait être comprise entre 80 000 et 118 000 t d'U en 2030 (voir tableau 4.1). Les principaux pays producteurs sont l'Australie, le Canada, le Kazakhstan, la Namibie, le Niger et la Russie, une diversité géopolitique propice à la sécurité d'approvisionnement.

Tableau 4.1 Capacité mondiale de production d'uranium jusqu'en 2030 (10³ t d'U/an)

Année	I*	II*
2010	80,7	86,7
2020	88,5	122,6
2030	83,1	117,9

* I = Capacité de production des centres existants et commandés utilisant des ressources identifiées récupérables à des coûts < 80 USD/kg d'U.

* II = Capacité de production des centres existants, commandés, programmés et en projet utilisant des ressources identifiées récupérables à des coûts < 80 USD/kg d'U.

Source : AEN, 2008a.

Néanmoins, les capacités de production prévues couvrent à peine les besoins annuels estimés pour 2030 calculés d'après les scénarios d'évolution de la puissance nucléaire installée présentés au chapitre 2 et les caractéristiques de fonctionnement moyennes des réacteurs actuellement en service (voir tableau 4.2). En 2050, les besoins annuels devraient être compris entre 100 000 et 265 000 t d'U. On obtient donc des besoins cumulés d'environ 5,4 millions de tonnes d'uranium jusqu'en 2050 dans le scénario haut, soit à peu près le volume total des ressources identifiées qui est évalué à environ 5,5 millions de tonnes au début de l'année 2007.

Tableau 4.2 Estimation des besoins mondiaux en uranium pour les réacteurs de puissance

	Puissance nucléaire (GWe)		Besoins en uranium (10 ³ t d'U/an)	
	Scénario bas	Scénario haut	Scénario bas	Scénario haut
2010	373	379	69.5	70.7
2020	388	474	72.3	88.4
2030	404	619	75.4	115.5
2040	442	879	82.3	163.8
2050	576	1 418	107.4	264.4

Source : estimations du Secrétariat.

Les besoins en uranium « engagés » (c'est-à-dire la quantité cumulée d'uranium requise pour alimenter les réacteurs en service en 2050 jusqu'à la fin de leur durée de vie) atteindraient 8,8 millions de tonnes d'uranium dans le scénario bas et 13,3 millions de t d'U dans le scénario haut.

Les tendances récentes révèlent que la hausse des prix de l'uranium a relancé les efforts de prospection et stimulé la découverte de nouvelles ressources et la réévaluation de ressources existantes conduisant à inclure certaines ressources précédemment considérées comme non rentables dans la catégorie des ressources économiquement exploitables. Cette évolution indique que la sécurité d'approvisionnement en uranium de la planète ne devrait pas poser de problème majeur à moyen terme.

Néanmoins, le recul de la demande d'uranium engendré par l'introduction de réacteurs rapides pourrait avoir un impact négatif sur l'industrie minière conduisant à des problèmes d'approvisionnement dans le cadre des scénarios de transition. En effet, la réduction des investissements dans la prospection et le développement, voire la fermeture prématurée de centres de production, seraient susceptibles d'entraîner un déséquilibre entre l'offre et la demande pendant la période de transition. Cependant, comme il est probable que le déploiement de réacteurs et de cycles du combustible avancés soit très progressif, le secteur minier de l'uranium devrait avoir le temps de s'adapter.

Conversion

La capacité de production actuelle des usines de conversion du concentré uranifère en hexafluorure d'uranium (UF₆) est légèrement supérieure à 55 000 t d'U/an, donc suffisante pour satisfaire la demande. Cette capacité devrait augmenter dans les dix ans à venir pour atteindre environ 75 000 t d'U/an d'ici 2015 (AEN, 2008b). Les principales usines de conversion se trouvent au Canada, aux États-Unis, en France et en Russie.

La mise en œuvre de programmes de transition nécessitera de créer des installations spécifiques, dédiées à la conversion de l'uranium retraité. Adapter les capacités industrielles à la future demande du secteur présente une difficulté non pas technique, mais économique. Dans des scénarios de transition, l'industrie sera confrontée aux incertitudes concernant l'avenir de la demande et donc aux risques financiers accrus associés à la construction d'usines destinées, par exemple, à convertir l'uranium issu du retraitement du combustible usé des REO. La coopération internationale, qui permettrait d'ouvrir les marchés au-delà des territoires nationaux, pourrait être un moyen d'améliorer la viabilité économique des installations.

Enrichissement

Les capacités d'enrichissement actuelles sont suffisantes pour répondre à la demande, et plusieurs pays prévoient de construire de nouvelles usines pour remplacer les installations vieillissantes arrivées en fin de vie et augmenter la capacité mondiale totale (voir tableau 4.3). Les nouvelles unités en construction ou programmées appliqueront le procédé de centrifugation gazeuse, plus économe en énergie que le procédé de diffusion gazeuse utilisé dans les unités déjà fermées ou sur le point de l'être.

Tableau 4.3 Principales capacités mondiales d'enrichissement (10³ UTS/an)

Pays/consortium	2007	2015 (projection)
Chine	1 000	3 500
France	10 000	10 000
Japon	1 000	1 500
Russie	14 500 (+8 000**)	20 500
États-Unis	11 000 (+4 500**)	10 500
Urenco*	8 500	17 500
Total	46 000 (+12 500**)	63 500

* Allemagne/Pays-Bas/Royaume-Uni.

** Capacité de traitement de l'uranium hautement enrichi d'origine militaire.

Source : AEN, 2008b.

Le recyclage de l'uranium de retraitement soulève certaines difficultés techniques pour l'enrichissement, comme pour la conversion. Même s'il est plus simple d'adapter les procédés de centrifugation au réenrichissement de l'uranium de retraitement, le secteur devra s'adapter à l'évolution de la demande pendant la période de transition. En outre, la demande d'uranium enrichi est appelée à disparaître si/quand les réacteurs thermiques sont/seront remplacés par des réacteurs rapides. Bien

qu'il s'agisse d'une perspective à très long terme, les industriels doivent s'apprêter à amortir les investissements dans de nouvelles installations avant la fin de la période de transition.

Fabrication du combustible

Comme l'a prouvé l'évolution de ce secteur pendant la période de développement des centrales existantes, la construction d'usines de fabrication de combustible ne nécessite pas d'importantes dépenses d'investissement et peut se faire dans des délais suffisamment raisonnables pour qu'il soit possible de s'adapter à la demande de nouveaux types de combustibles. Cependant, comme pour d'autres étapes du cycle du combustible, les programmes de transition pourraient soulever la question des économies d'échelle si les installations restent nationales. L'internationalisation des marchés est un moyen de résoudre le problème : des usines de fabrication pourraient produire pour plusieurs pays les volumes de chaque type de combustible nécessaire pendant la période de transition, comme c'est le cas aujourd'hui de la plupart des combustibles des réacteurs à eau ordinaire.

4.2.2 Construction et exploitation des réacteurs

Les centrales nucléaires actuelles ont une puissance installée cumulée d'environ 370 GWe et comptent principalement des réacteurs thermiques refroidis à l'eau (voir tableau 4.4). Des tranches représentant une trentaine de GWe supplémentaires sont en construction dans une douzaine de pays.

Tableau 4.4 Puissance nucléaire installée par filière de réacteur

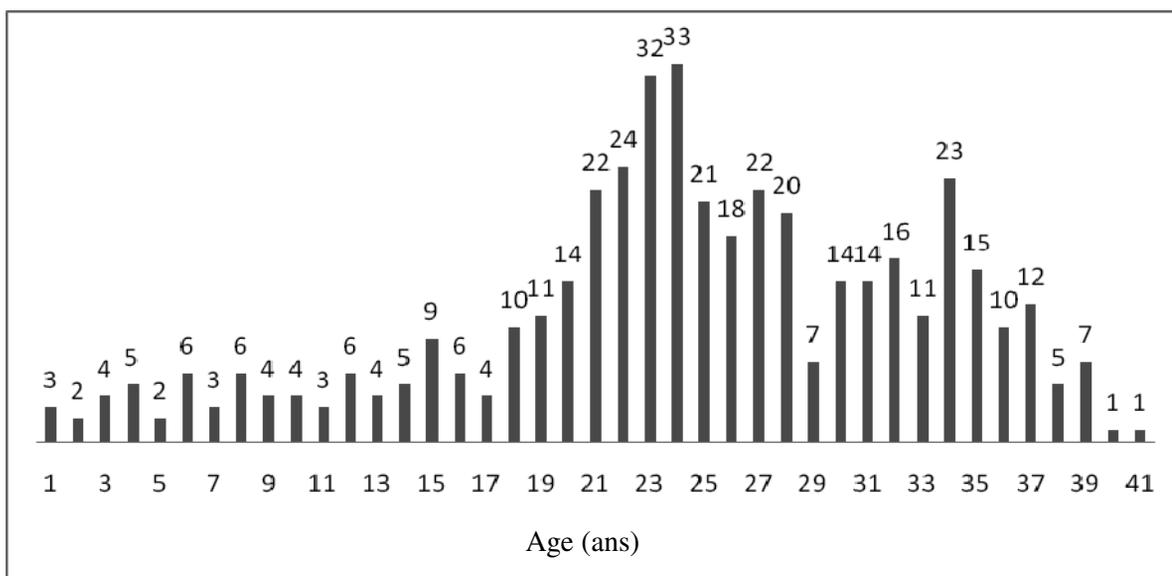
Filière de réacteur	Puissance installée (GWe)	% de la puissance totale
REP	243,4	65
REB	85,3	23
PHWR	22,4	6
Autres <i>(dont RNR)</i>	21,1 <i>(0,7)</i>	6 <i>(0,2)</i>
Total	372,2	100

Source : AIEA, base de données PRIS (système de documentation sur les réacteurs de puissance).

La plupart des réacteurs actuels ont été raccordés au réseau dans les années 70 ou 80, donc sont en service depuis au moins 30 ans (voir figure 4.1), et ont été conçus pour être exploités pendant 30 ou 40 ans. Cependant, on entreprend actuellement de prolonger, parfois jusqu'à 60 ans, la durée de vie de la majorité d'entre eux. Leur remplacement devrait donc avoir lieu entre 2020 et 2050.

L'âge aujourd'hui et la durée de vie des réacteurs existants sont des paramètres dont il faut absolument tenir compte pour élaborer le calendrier de leur remplacement par des réacteurs rapides. En effet, il ne serait pas réaliste d'appliquer des programmes de transition nécessitant la fermeture prématurée de réacteurs thermiques, tant que leurs niveaux de sûreté et leurs performances techniques restent excellents et qu'ils produisent de l'électricité de façon fiable et à des coûts avantageux.

Figure 4.1 Nombre et âge des réacteurs en service en 2008



Source : AIEA, base de données PRIS.

4.2.3 Aval du cycle du combustible

En aval du cycle, l'accumulation de combustible utilisé pourrait poser un problème si l'option du cycle ouvert est adoptée si les dépôts nécessaires ne sont pas disponibles en temps voulu. Cependant, il a été démontré que le combustible utilisé peut être entreposé en toute sûreté pendant plusieurs décennies.

D'un autre côté, la fermeture du cycle du combustible, qui nécessite la construction d'installations de retraitement et de recyclage, n'élimine pas totalement la production de déchets. En conséquence, elle exige également la construction et l'exploitation de dépôts de stockage, même s'ils sont de taille plus réduite et beaucoup moins nombreux.

Stocks de combustible utilisé

Selon des chiffres de 2007 (AEN, 2007), il existe aujourd'hui environ 200 000 tonnes de combustible utilisé dans le monde (voir tableau 4.5). Ces stocks, qui contiennent près de 1 % de plutonium en moyenne, pourraient servir à alimenter un parc de réacteurs rapides pendant une période de transition, sous réserve que des capacités de retraitement et de fabrication de combustible suffisantes soient déployées en temps voulu.

Tableau 4.5 Stocks de combustible utilisé à la fin de 2005 (10³ tML)

Région	UOX REO	MOX REO	RNR surgénérateur	Autres
OCDE Amérique	54,2		0,06	35,6
OCDE Europe	30,8	1	–	6,4
OCDE Pacifique	19,5			
Non OCDE	53,0			
Total	157,5	1	0,06	42,0

Source : AEN, 2007.

Si la puissance nucléaire installée augmente conformément aux prévisions exposées au chapitre 2, la quantité annuelle de combustible utilisé déchargée en 2050 sera comprise entre 15 000 et 38 000 tonnes (voir tableau 4.6). Le stockage de la totalité du combustible utilisé produit dans le monde nécessiterait alors l'ouverture, d'ici 2050, d'une dizaine de sites de la taille du dépôt de Yucca Mountain programmé aux États-Unis.

Tableau 4.6 Combustible utilisé déchargé chaque année

	Puissance nucléaire (GWe)		Combustible utilisé déchargé (10 ³ tML/an)	
	Scénario bas	Scénario haut	Scénario bas	Scénario haut
2010	373	379	10,3	10,9
2020	388	474	12,4	14,4
2030	404	619	13,7	17,8
2040	442	879	13,8	23,6
2050	576	1 418	15,4	38,0

Traitement du combustible usé

Les capacités de retraitement reflètent les choix des différents pays concernant le cycle du combustible. À l'heure actuelle, le nombre d'usines en service est très faible (voir tableau 4.7).

Tableau 4.7 Principales capacités de retraitement dans le monde (tML/an)

Pays	Capacité nominale en 2007	Production cumulée jusqu'en 2007
Chine	–	–
France	1 700	22 700
Inde	–	–
Japon	800	0
Russie	400	4 000
Royaume-Uni	900	4 000
États-Unis	–	–
Total	3 800	30 700

Source : AEN, 2008b.

Les capacités existantes sont suffisantes pour satisfaire la demande des prochaines années mais, à l'évidence, il faudra qu'elles augmentent substantiellement si des programmes de transition sont appliqués à l'échelle mondiale. D'après les projets et plans annoncés par l'industrie, la capacité de retraitement pourrait atteindre 7 000 tonnes de métal lourd par an d'ici 2030 si la demande du marché le justifie (AEN, 2008b).

4.2.4 Aspects stratégiques de la transition

À supposer que les nouvelles technologies nucléaires actuellement mises au point puissent être déployées à l'échelle commerciale et industrielle dans trente ans, la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides pourrait commencer à l'horizon 2040-2050 (voir scénarios de la France et du Japon au chapitre 5).

Comme on l'a vu au chapitre précédent, l'intégration de réacteurs rapides au parc de réacteurs thermiques vise à satisfaire des objectifs différents selon les pays. Néanmoins, l'un des deux grands objectifs suivants est généralement poursuivi et influe sur le choix du type de RNR à déployer :

- Si l'objectif principal est de réduire le volume de déchets radioactifs, en général pour limiter la quantité de plutonium restant dans les déchets et réduire la charge thermique des dépôts afin d'en multiplier par 3 ou plus la capacité, les RNR sélectionnés seront des réacteurs à faibles facteurs de conversion (proches de 0,5 à 0,6).
- Si l'objectif principal est de s'affranchir des contraintes liées à l'approvisionnement en uranium, et que la réduction des déchets est secondaire, les RNR sélectionnés auront des facteurs de conversion élevés (autour de 1,0 à 1,2). À ce sujet, on notera que, théoriquement, un REO chargé en combustible UOX produit suffisamment de plutonium pendant sa durée de vie (60 ans) pour que l'on puisse mettre en service un réacteur rapide surgénérateur de même puissance, qui sera auto-suffisant pendant plusieurs siècles.

Pendant la période de transition, si on suppose une augmentation globale de la puissance nucléaire installée, on peut émettre les hypothèses suivantes sur les installations du cycle du combustible :

- Les capacités de l'amont du cycle seront ajustées aux besoins, à savoir normalement les volumes d'UOX consommés par les REO, sachant que chaque tranche de 1 GWe nécessite environ 160 tonnes d'uranium naturel et 100 000 unités de travail de séparation (UTS) par an.
- Les capacités de l'aval du cycle dépendront de la cadence de mise en service des réacteurs rapides et de la disponibilité du combustible utilisé. Par exemple, il faut entre 8 et 15 tonnes de plutonium – selon les caractéristiques des réacteurs et des cycles du combustible – pour alimenter un RNR au sodium de 1 GWe exploité en mode recyclage. Cette quantité peut être fournie en retraitant 1 500 tonnes de combustible UOX usé de REO ou de 300 tonnes de combustible usé MOX de REO. L'uranium retraité sera recyclé avec le plutonium pour éviter, le plus longtemps possible, toute consommation supplémentaire d'uranium naturel.

4.3 Facteurs économiques

La transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides durera plusieurs décennies pendant lesquelles le coût de production de l'électricité évoluera de même que d'autres paramètres économiques des systèmes nucléaires en service. Certains modèles et méthodologies permettent d'évaluer les coûts des systèmes RNR avancés avec fiabilité lorsqu'on connaît les coûts unitaires avec des marges d'incertitude raisonnables, c'est-à-dire lorsque les concepts ont atteint une certaine maturité. À titre d'exemple, les coûts des systèmes RNR avancés peuvent être calculés en appliquant la méthodologie et l'outil informatique de l'*Economic Modeling Working Group* (Groupe de travail sur la modélisation économique) de GIF (GIF, 2007 et 2008). Cependant, pour procéder à l'évaluation économique complète des scénarios de transition, il faut non seulement estimer les coûts de production, mais aussi effectuer une analyse dynamique complexe en tenant compte des coûts d'investissement totaux et de l'évolution des coûts de production au cours du temps.

Quant on cherche à évaluer les coûts associés aux scénarios de transition, il est indispensable de considérer l'ensemble des étapes du déploiement du parc de réacteurs rapides. En particulier, les coûts de recherche, de développement et de démonstration (RD-D) doivent être inclus dans l'évaluation économique. Ces coûts peuvent constituer un problème majeur au niveau national lorsque les systèmes avancés envisagés impliquent des efforts de RD-D non seulement sur les réacteurs, mais aussi sur plusieurs installations du cycle du combustible.

Les indicateurs économiques classiques, parmi lesquels les coûts d'investissement et les coûts totaux de la production d'électricité peuvent s'appliquer aux scénarios de transition, mais doivent être évalués à l'aide d'un modèle dynamique car le parc de réacteurs et les installations du cycle du combustible évolueront progressivement pendant la période de transition. En outre, quand on veut réaliser une évaluation économique globale et complète, on doit aussi prendre en compte des externalités telles que la sécurité d'approvisionnement, la stabilité des coûts de production, la durabilité à long terme et les impacts non internalisés sur l'environnement et la santé.

4.3.1 Coûts de recherche, développement et démonstration

Les réacteurs thermiques en service aujourd'hui ou sur le point d'être construits ont atteint le stade de la maturité industrielle et commerciale. C'est pourquoi la R-D nécessaire pour les construire et les exploiter est marginale et sera principalement financée par l'industrie puis intégrée aux coûts et aux prix de l'électricité produite. Par contre, les réacteurs rapides exigent des efforts de RD-D considérables, même si la faisabilité de certains concepts envisagés, comme le RNR refroidi au sodium, a déjà été démontrée. Tous les réacteurs rapides, y compris le RNR refroidi au sodium, nécessiteront la construction d'un prototype ou d'un démonstrateur. Les concepts plus avancés, tels que le GFR ou le LFR, nécessiteront des recherches plus longues et plus coûteuses, notamment des essais de matériaux et de combustibles et la construction de prototypes de réacteurs et d'installations du cycle du combustible.

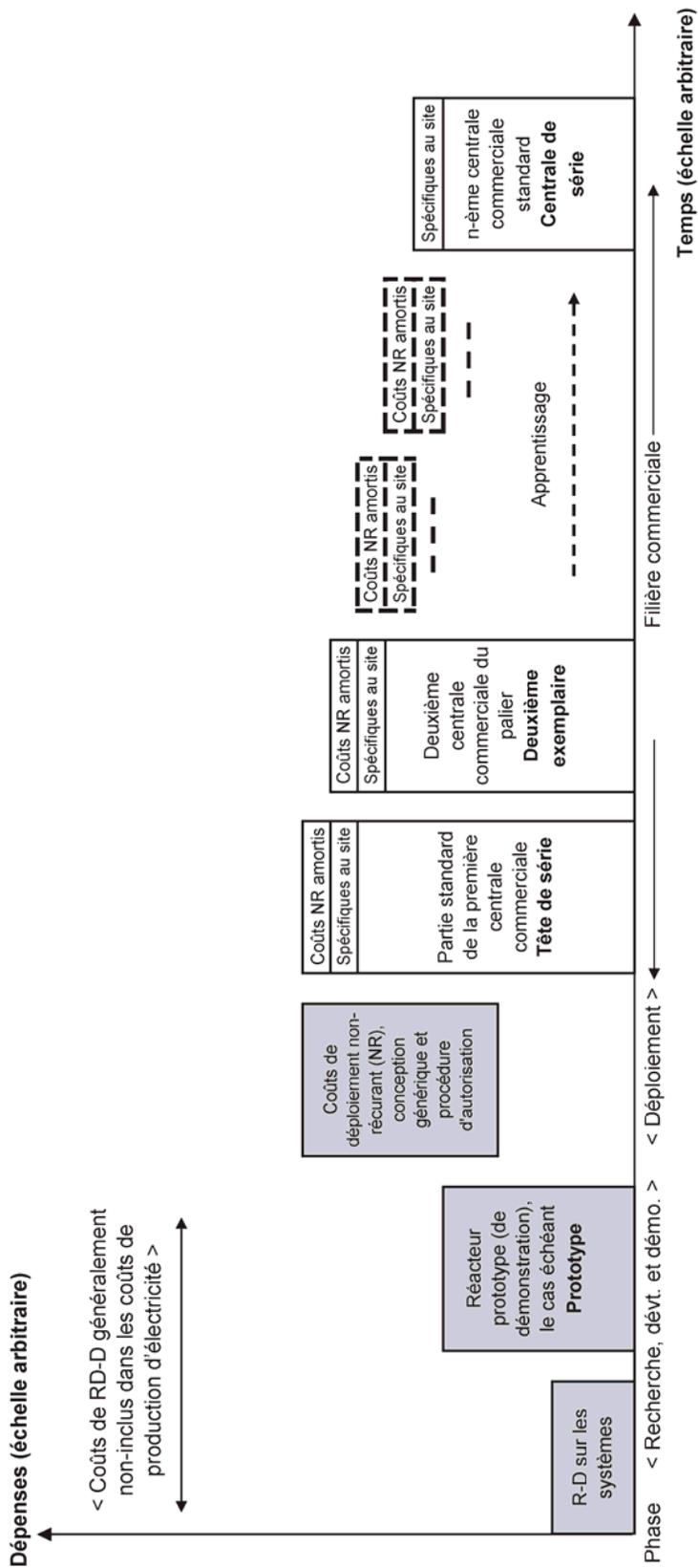
La figure 4.2, inspirée la publication du groupe de travail économique du GIF (GIF, 2007), illustre la distribution des catégories de coûts au cours du temps, de l'étape de la RD-d à celle des centrales de série. On y distingue les coûts inclus dans le prix de l'électricité (ou de tout autre produit de la centrale nucléaire) et les coûts qui ne sont généralement pas internalisés (zones grisées). Cette représentation graphique est illustrative uniquement ; les échelles horizontale et verticale sont arbitraires et ne correspondent à aucun concept spécifique.

Comme une proportion importante des coûts de R-D ne sera pas intégralement prise en charge par le secteur privé, l'État aura un rôle primordial à jouer pour favoriser la mise au point des systèmes avancés appelés à être déployés pendant la période de transition. Les pouvoirs publics et les décideurs de l'industrie doivent bien mesurer au plus tôt des coûts des programmes de R-D indispensables à la mise en œuvre de systèmes RNR, ainsi que des délais pendant lesquels il est peu probable que ses systèmes soient concurrentiels.

Le renforcement de la coopération internationale pour mettre au point des systèmes nucléaires avancés devrait faciliter le financement des travaux de R-D et améliorer la rentabilité des investissements grâce aux synergies entre pays et établissements de recherche. Les initiatives internationales telles que GIF devraient favoriser le lancement de programmes de recherche communs et, finalement, la mise au point de systèmes innovants de haute performance.

Néanmoins, il sera utile que chaque pays procède à des analyses économiques approfondies pour évaluer les coûts et les avantages des scénarios de transition avant de s'engager dans des programmes à long terme coûteux. Les bénéfices des scénarios de transition dépendent de la taille du marché de l'électricité (et, le cas échéant, d'autres produits) accessible (marché national et exportations potentielles), et aussi de l'importance accordée par la politique nationale à la sécurité d'approvisionnement et à la gestion des actinides.

Figure 4.2. Exemple de distribution des coûts de la RD-D et d'une centrale de série standard



Note : les zones en gris correspondent aux coûts qui ne sont normalement pas internalisés dans les prix de l'électricité.

Source : GIF, 2007.

4.3.2 Analyse économique de la période de transition

Comme on l'a vu aux chapitres précédents, la période de transition sera très longue, de plusieurs décennies au moins, et l'équilibre pourrait n'être atteint qu'au bout d'un siècle. Si on considère le recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau comme la première phase d'un scénario de transition (ce qui est le cas dans certains pays), on peut dire que certains de ces scénarios ont commencé il y a quelques années. Le déploiement de réacteurs rapides avancés, prévu à l'horizon 2040-2050, marquera le début de la deuxième phase, pendant laquelle on continuera d'exploiter les réacteurs à eau jusqu'à la fin de leur vie nominale (le plus souvent, 60 ans). La période de transition sera terminée lorsque le parc électronucléaire sera intégralement composé de systèmes RNR à l'équilibre.

L'analyse économique de la période de transition proprement dite (de 2040-2050 jusqu'à 2100 et au-delà) doit se faire en tenant compte de l'objectif visé, à savoir la création d'un parc de réacteurs rapides, et par comparaison avec la situation actuelle à l'équilibre du parc de réacteurs thermiques existant. Étant donné les incertitudes concernant les paramètres externes tels que la demande d'électricité et les prix des combustibles fossiles, toute analyse économique ne peut qu'être indicative, et effectuée au moyen d'études de sensibilité. Cependant, de telles analyses peuvent appuyer les décisions dans des cadres de réflexion multicritères couvrant les autres aspects du développement durable, c'est-à-dire les facteurs sociaux et environnementaux.

L'analyse économique de la première phase s'effectue simplement selon la méthode habituelle d'estimation des coûts d'investissement, des coûts du cycle du combustible et des coûts moyens de production d'électricité. Les coûts unitaires sont bien établis et les marges d'incertitude faibles, s'agissant de réacteurs thermiques et d'usines du combustible déjà en service industriel.

La période de transition proprement dite, au cours de laquelle doivent coexister des réacteurs thermiques et des réacteurs rapides, nécessite une analyse économique dynamique. Le parc installé comprend des réacteurs thermiques et des réacteurs rapides en proportion variable. Les installations du cycle doivent pouvoir traiter les deux types de combustibles et satisfaire des flux de demande faibles et variables. De ce fait, leur optimisation économique sur cette période de transition devra être effectuée en fonction d'une demande variable et de capacités en deçà de l'optimum (voir chapitre 5).

Les coûts supplémentaires payés pendant la période de transition doivent être évalués avec soin et comparés aux avantages escomptés à la fin de la période, c'est-à-dire quand un parc de RNR fonctionnera à l'équilibre. Les installations du cycle du combustible multinationales, régionales ou internationales peuvent être considérées comme un moyen d'aboutir à une meilleure optimisation économique pendant la transition. Cependant, leur utilisation peut poser d'autres problèmes économiques (par exemple, coûts du transport et des contrôles de garanties) à ne pas négliger.

Les principaux indicateurs économiques utilisés pour analyser la période de transition restent les coûts d'investissement, les coûts du cycle du combustible et les coûts totaux de production d'électricité, mais les méthodes appliquées pour les calculer deviennent dynamiques. Les chiffres à considérer sont non seulement les valeurs absolues calculées à un instant donné, mais aussi les moyennes sur la période et l'amplitude de variation.

La dernière phase est caractérisée par une plus grande homogénéité du parc électronucléaire, uniquement composé d'un ou plusieurs systèmes à RNR. Les installations du cycle du combustible peuvent être adaptées à une demande stable évoluant uniquement en fonction de la puissance nucléaire installée totale. Les coûts de production peuvent être estimés à l'aide de modèles de coûts à l'équilibre. Les incertitudes sur les coûts unitaires restent un problème important pour l'évaluation économique de

cette phase. Comme la conception des réacteurs et installations du cycle du combustible vient tout juste de commencer, les marges d'incertitude sur les coûts et les aléas à prendre en compte sont très importants et pourraient, dans certains cas, empêcher toute analyse coûts-avantages fiable des scénarios de transition.

4.3.3 Coûts d'investissement dans les systèmes nucléaires

L'évaluation des coûts d'investissement pour les scénarios de transition doit porter sur les réacteurs et les installations du cycle du combustible. En particulier, il est indispensable d'évaluer le total des investissements dans les installations nécessaires au cours de la période de transition mais appelées à devenir obsolètes lorsqu'un système entièrement fondé sur des RNR sera en place. Les coûts d'investissement de la totalité de ces installations doivent être comparés aux bénéfices attendus d'un système RNR à l'équilibre.

Les principaux indicateurs à évaluer pour analyser les coûts d'investissement sont les coûts de construction directs et les coûts d'investissement totaux, y compris les intérêts intercalaires. Les marges d'incertitude et provisions pour aléas représentent une part importante de l'évaluation car les réacteurs et installations du cycle du combustible envisagés dans les scénarios de transition reposent sur des technologies avancées pour lesquelles on dispose uniquement d'estimations de coûts prospectives, comme c'est le cas pour tous les systèmes et technologies innovants.

Deux approches peuvent être adoptées pour estimer les coûts de construction des systèmes avancés :

- méthode descendante, fondée sur des ratios et des données détaillées disponibles pour des systèmes similaires ;
- méthode conventionnelle d'estimation ascendante (ingénierie des coûts), applicable à des projets classiques sur le point d'être déployés ou à des parties d'un projet sur lesquelles on dispose de suffisamment de données pour comptabiliser l'ensemble des matériels de construction, équipements à installer et heures travaillées.

Les récentes augmentations des prix des matières premières et des matériels ont montré à quel point la validité des résultats des évaluations économiques peut être éphémère. Les coûts de construction des centrales, qu'elles soient nucléaires ou thermiques à flamme, et les coûts de production d'électricité évalués il y a quelques années sont aujourd'hui périmés. C'est pourquoi il importe de revoir régulièrement les évaluations économiques effectuées pour décider de mettre ou non en œuvre un scénario de transition, afin de vérifier qu'elles sont toujours valides malgré l'évolution du contexte économique mondial. En outre, ces analyses économiques doivent comprendre des analyses de sensibilité, qui indiquent dans quelle mesure varient les résultats quand on modifie les coûts unitaires ou les prix.

4.3.4 Coûts totaux du cycle du combustible

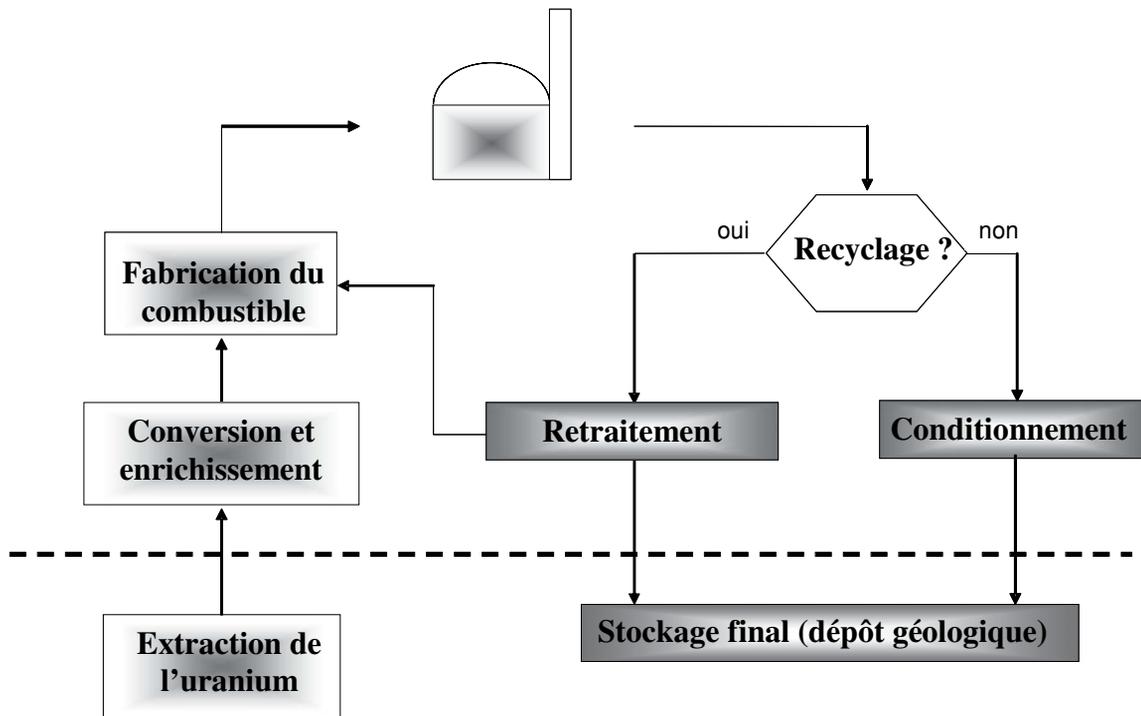
La figure 4.3 illustre les étapes à prendre en compte lorsqu'on calcule les coûts du cycle du combustible.

Sauf en ce qui concerne l'achat d'uranium, toutes les étapes correspondent à des services assurés par des entreprises et les indicateurs économiques sont fournis par les prix du marché. Pour les cycles du combustible actuels, par exemple le cycle partiellement fermé avec réacteurs thermiques à eau et recyclage du MOX dans les REO, le secteur des services a atteint sa maturité et les prix sont soumis aux mécanismes du marché. Les coûts du cycle du combustible peuvent être estimés à partir de ces prix unitaires.

En revanche, dans le cas des cycles du combustible avancés, aucune installation n'est déployée à l'échelle industrielle et en service, donc on ne dispose pas des prix du marché. Par exemple, on ne connaît pas le prix des procédés pyrométallurgiques et pyrochimiques innovants de fabrication, retraitement et refabrication du combustible. Pour ces systèmes, les prix des services du cycle du combustible sont en général indisponibles. Le coût unitaire d'un service du cycle du combustible, par exemple en USD/kgML de combustible fabriqué, doit donc être calculé à l'aide d'une méthode similaire à celle que l'on emploie pour évaluer les coûts de production d'électricité. Le coût d'un service est estimé sur la base des coûts d'investissement dans l'usine, de ses coûts de fonctionnement (exploitation, maintenance et produits consommables) et de la production totale de l'usine pendant sa durée de vie économique, compte tenu de sa capacité et de son coefficient de disponibilité prévu.

Le coût moyen du cycle du combustible d'un parc de réacteurs en transition doit être estimé en tenant compte des deux types d'installations (traditionnelles et avancées) et de la demande associée à chaque type. Lorsque l'hypothèse d'installations multinationales est envisagée, les coûts du cycle du combustible doivent intégrer les coûts des transports internationaux.

Figure 4.3 Représentation schématique des étapes du cycle du combustible nucléaire



4.3.5 Coûts de production de l'électricité

Le coût unitaire moyen est un indicateur fondamental lorsqu'on procède à l'évaluation économique de systèmes de production d'électricité, même s'il est évidemment loin d'être le seul critère important. Ce coût est composé de quatre éléments principaux : les coûts en capital (coûts de construction directs et intérêts intercalaires), les coûts d'exploitation et de maintenance, les coûts du cycle du combustible et les coûts de démantèlement.

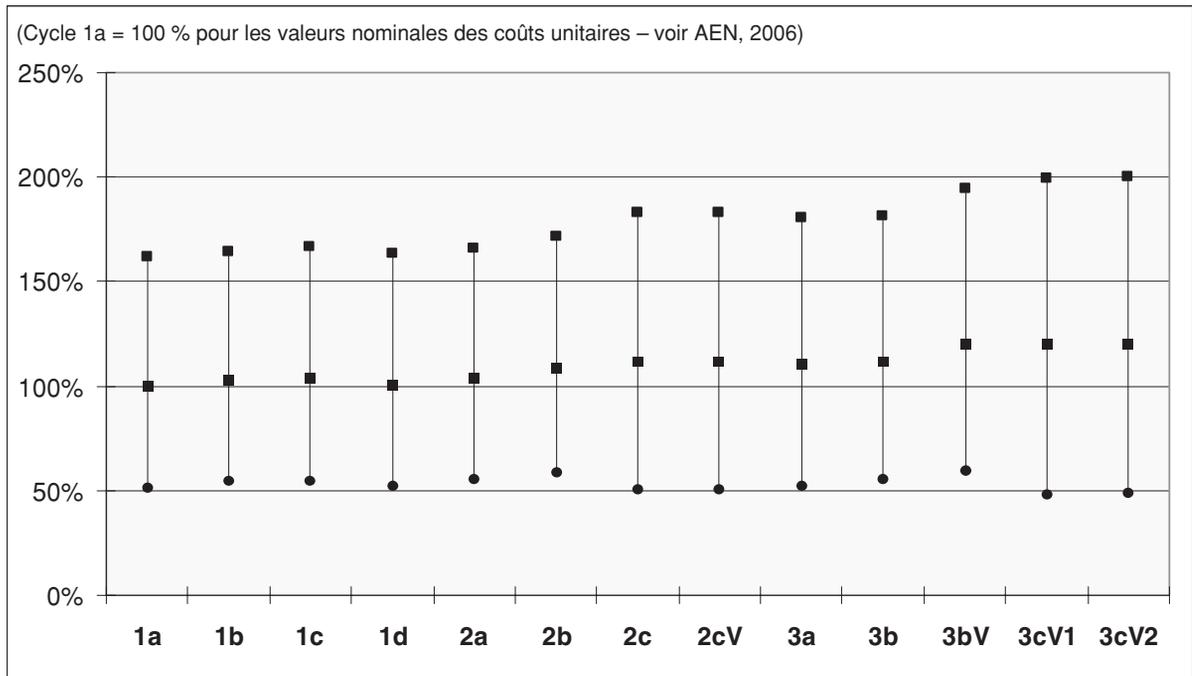
Dans un rapport publié en 2006, l'AEN propose une analyse détaillée des coûts de production de divers systèmes RNR avancés à l'équilibre, par rapport aux coûts de production de systèmes à réacteurs thermiques et cycle ouvert. Les principales conclusions de l'analyse sont que les

performances économiques ne sont pas un facteur décisif lorsqu'on compare les systèmes à réacteurs thermiques et cycle ouvert aux systèmes à RNR et cycle fermé. Comme le montre la figure 4.4, il est impossible de déterminer quelle est l'option « la moins chère », étant donné les incertitudes sur les coûts unitaires.

Plusieurs réacteurs et cycles du combustible doivent coexister pendant la période de transition, donc l'évaluation des coûts de production doit se faire année par année, en tenant compte de l'évolution de la composition du parc électronucléaire. Cette évaluation est nécessairement propre à chaque scénario et il est difficile de tirer des conclusions générales d'estimations réalisées pour un contexte national ou régional particulier.

Bien que le coût ne soit pas le seul indicateur à prendre en compte, ni même, dans la plupart des cas, un facteur déterminant pour le choix des options de gestion des matières fissiles, améliorer les aspects économiques de la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides est un objectif pertinent. Les progrès technologiques et la planification minutieuse de la période de transition sont des moyens efficaces de contrôler les coûts de la transition. La coopération internationale et les installations multinationales peuvent aussi être des moyens très efficaces d'optimiser les coûts des diverses installations du cycle du combustible, et donc de réduire leurs coûts spécifiques.

Figure 4.4 Coûts de production moyens pour différents systèmes nucléaires



Source : AEN, 2006.

Note : 1a = cycle ouvert (référence) ; 1b = retraitement classique (monorecyclage du Pu sous forme de MOX dans les REO) ; 1c = variante de 1b avec recyclage du Np et du Pu ; 1d = cycle DUPIC (le combustible utilisé des REO est recyclé directement dans les réacteurs CANDU) ; 2a = incinération du Pu dans des REO (combustible MOX fabriqué avec de l'U enrichi) ; 2b = incinération du Pu et de l'Am dans des REO ; 2c = recyclage hétérogène de l'Am ; 2cV = variante de 2c avec entreposage de l'Am et du Cr ; 3a = incinération des TRU dans des RNR ; 3b = cycle à double strate, comprenant des systèmes hybrides, avec incinération du Pu dans des REO et des RNR ; 3bV = variante de 3b avec transfert direct du Pu du MOX des REO dans des systèmes hybrides ; 3cV1 = stratégie tout RNR avec GFR de quatrième génération ; 3cV2 = variante de 3cV1 avec UREX+. Voir (AEN, 2006) pour de plus amples informations sur les différents cycles.

4.4 Rôle des pouvoirs publics

Cette section passe en revue les domaines d'action prioritaires pour les pouvoirs publics pendant la conception et la mise en œuvre des scénarios de transition. Ceux-ci ont un rôle majeur à jouer à tous les niveaux et à toutes les étapes de la conception et de l'application des politiques nucléaires mais ils sont plus directement concernés par des décisions nationales à prendre à long terme. Ainsi, la décision d'amorcer ou non une transition ne peut pas résulter des seuls mécanismes du marché du fait de l'absence d'incitations à court terme pour les acteurs économiques du secteur privé.

De nombreux aspects des scénarios de transition, de la recherche et l'enseignement à l'infrastructure juridique et réglementaire, sont partiellement ou totalement du ressort des pouvoirs publics. Par exemple, un gouvernement peut choisir de soutenir certaines options conformes aux objectifs de sa politique énergétique nationale et sources d'avantages sociaux à long terme même si, du seul point de vue du marché concurrentiel, elles ne sont pas viables.

4.4.1 R-D, enseignement et formation, infrastructures

Le développement de systèmes nucléaires avancés nécessite des programmes de R-D fondamentale et à longue échéance financés, au moins en partie, par le secteur public car les résultats escomptés ne présentent pas d'avantage direct pour l'industrie. Sachant que la mise en œuvre de scénarios de transition est principalement motivée par les bénéfices « sociaux » associés à la fermeture du cycle du combustible – sécurité d'approvisionnement en énergie et réduction du volume et de la radiotoxicité des déchets – il semble pertinent que les pouvoirs publics soutiennent la construction d'infrastructures, la R-D, l'enseignement et les formations nécessaires au développement des systèmes à réacteurs rapides.

Il importe que les pays engagés sur la voie de la transition adaptent en conséquence les objectifs et la portée de leurs programmes de R-D nationaux, leurs stratégies d'enseignement et de formation, ainsi que leurs infrastructures. Certains pays de petite taille ou dotés de peu d'infrastructures nucléaires pourraient ainsi décider de ne développer que des systèmes à réacteurs thermiques et stockage direct du combustible usé, afin d'éviter d'avoir à construire les installations industrielles nécessaires au fonctionnement de systèmes RNR. Ils pourraient aussi opter pour le recyclage, en achetant des services sur le marché international ou en ayant recours à des installations du cycle du combustible internationales si de telles structures sont finalement déployées.

Les évaluations des coûts, risques et avantages de l'énergie nucléaire diffèrent selon les pays. Certains ont clairement décidé de maintenir ou d'accroître leur puissance installée ; d'autres prévoient de réduire ou d'abandonner la production électronucléaire ; d'autres enfin envisagent de relancer leur industrie nucléaire ou d'en construire une dans les années à venir. Toutes ces politiques nationales peuvent évoluer (comme elles l'ont fait par le passé) en fonction du contexte économique, social et politique du pays mais aussi du contexte mondial (par exemple, importance croissante donnée par les décideurs au changement climatique et aux questions de développement durable).

Qu'ils décident de poursuivre ou d'interrompre la production électronucléaire, tous les pays dotés de réacteurs de puissance doivent gérer et, finalement, stocker leur combustible usé et d'autres déchets de haute activité. Pour bon nombre d'entre eux, la politique actuelle de gestion des déchets est le stockage direct du combustible usé, après une période d'entreposage en sub-surface de 40 à 150 ans. Néanmoins, le recours à des systèmes à neutrons rapides est envisagé dans la plupart des programmes de R-D mis en place dans divers pays, et dans des cadres multinationaux et internationaux, pour résoudre la question de la gestion des déchets radioactifs.

Aucun dépôt en formation géologique stable n'est encore en service, même si la viabilité technique de la solution a été démontrée pour la gestion des DHA déjà produits et à venir. La Finlande et les États-Unis ont approuvé la construction d'un dépôt géologique et identifié un site sur leur territoire. D'autres pays comme la Suède et la France sont aussi sur le point de sélectionner un emplacement, mais la plupart des pays ne l'ont pas encore fait. Dans ce contexte, deux facteurs conduisent les décideurs à s'intéresser de plus près aux solutions viables pour remplacer le stockage direct en dépôt géologique : la volonté d'assurer la durabilité à long terme de l'énergie nucléaire et la nécessité d'alléger le fardeau de la surveillance à long terme des DHA.

Étant donné les avantages potentiels des réacteurs à neutrons rapides, de grands programmes de R-D ont été lancés dans le monde pour étudier la transition des systèmes actuels à REO et cycle ouvert à de nouveaux systèmes à RNR et cycle fermé. Parmi ces programmes figurent notamment le projet Omega au Japon, les programmes *Accelerator Transmutation of Waste*, *Advanced Accelerator Applications* et *Advanced Fuel Cycle Initiative* aux États-Unis, ainsi qu'un vaste programme européen d'étude de la séparation-transmutation. Des initiatives analogues existent en Russie et en République de Corée. De nombreux programmes nationaux sont coordonnés au niveau de groupes de travail de l'AEN et dans le cadre de projets de l'AIEA (voir section 1.4). En parallèle, le GIF, le GNEP et d'autres initiatives visant à préparer l'avenir de l'énergie nucléaire à moyen et à long terme ont intégré ces concepts à leurs stratégies afin d'établir une feuille de route ou de dégager une vision stratégique pour la R-D et le déploiement industriel.

La mise au point de cycles du combustible avancés, jusqu'à leur déploiement industriel complet, nécessite d'importants efforts de R-D, notamment la construction d'un certain nombre de démonstrateurs et d'installations d'essais pilotes. Avec la stagnation de nombreux programmes électro-nucléaires nationaux, les budgets de R-D ont été réduits sévèrement. Au cours des dernières décennies, on a assisté, dans la plupart des pays de l'OCDE, à la diminution des activités de R-D, des financements publics et du nombre d'établissements de recherche dans le secteur nucléaire. En conséquence, les installations de recherche actuellement en service sont trop peu nombreuses et n'ont pas les capacités suffisantes pour préparer la transition vers les systèmes à neutrons rapides. Par exemple, plusieurs plans de recherche du GIF ont révélé des insuffisances des infrastructures indispensables pour les essais de matériaux et l'irradiation du combustible.

Pour pouvoir disposer d'installations de recherche sur lesquelles effectuer les divers essais nécessaires à la mise au point de réacteurs innovants et de cycles avancés, de nombreux instituts de recherche et entreprises ont coordonné leurs efforts aux niveaux régional ou international. Les coûts de développement et les plans de déploiement sont ainsi partagés à l'échelle d'une zone géopolitique plus étendue. Cette démarche est particulièrement avantageuse pour les pays ne s'étant pas encore engagés sur la voie du retraitement du combustible usé.

Ce type de démarche a également débouché sur l'examen et l'analyse d'approches dites régionales où il est prévu de partager des installations du cycle du combustible coûteuses et d'utiliser les matières nucléaires en concertation afin d'optimiser l'exploitation des ressources et des investissements dans un environnement régional mieux protégé contre les risques de prolifération. Cependant, il convient dans ce cas de ne pas négliger les problèmes que pourraient soulever les règles imposées par les autorités de sûreté nationales des pays hôtes d'une installation multinationale comme des pays utilisateurs.

Étant donné la diversité des systèmes exploités pendant la période de transition, les qualifications exigées du personnel chargé de la conception, de la construction et de l'exploitation des réacteurs et installations du cycle du combustible sont à la fois spécifiques et très variées. Or, les ressources humaines sont déjà rares dans le secteur nucléaire, du fait de la stagnation des programmes nucléaires

au cours des dernières décennies, du vieillissement de la main d'œuvre et du moindre intérêt porté au secteur par les jeunes actifs.

La relance escomptée des programmes nucléaires nécessite la conception de nouveaux programmes d'enseignement et de formation et/ou l'adaptation des programmes actuels, afin de répondre à la demande de personnel hautement qualifié dans toutes les branches du secteur nucléaire ainsi qu'au sein des autorités de sûreté. Il conviendra donc de prévoir les besoins spécifiques des scénarios de transition pour adapter en conséquence les capacités nationales et régionales d'enseignement et de formation.

4.4.2 Cadres réglementaires, sûreté, protection physique et non-prolifération

Tous les pays exploitant des centrales et installations du cycle du combustible se sont dotés de cadres réglementaires définissant les conditions de délivrance des autorisations, de protection de la santé humaine et de l'environnement, de surveillance des échanges internationaux liés au fonctionnement de ces installations, de protection physique et de lutte contre la prolifération des armes nucléaires. Le déploiement de RNR pendant la période de transition exigera quelques adaptations de ces cadres législatifs et réglementaires mais ne devrait nécessiter ni changement radical, ni disposition fondamentalement nouvelle.

Au niveau international, le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP) devrait faciliter l'autorisation de nouveaux concepts de réacteurs dans les différents pays, grâce au partage des ressources et des connaissances entre les autorités de sûreté nationales chargées d'évaluer ces concepts. Ce programme devrait notamment faciliter la mise en œuvre de scénarios de transition au plan national. Dix pays participent actuellement au MDEP : l'Afrique du Sud, le Canada, la République populaire de Chine, la République de Corée, les États-Unis, la Fédération de Russie, la Finlande, la France, le Japon et le Royaume-Uni.

Le MDEP comprend trois phases. Pendant la première, lancée en 2005, les autorités de sûreté nucléaire entendent utiliser les données techniques collectées lors de la certification d'un concept dans un pays pour préparer la certification du concept dans d'autres pays, évitant ainsi les études redondantes. Les autorités de sûreté nucléaire de France et de Finlande notamment travaillent avec leur homologue américaine à l'examen et l'évaluation de l'EPR (*European Pressurised-water Reactor*).

La deuxième phase du MDEP, qui a débuté à la mi-2006, a pour but d'identifier des pratiques et réglementations communes qui contribuent à renforcer la sûreté des nouveaux concepts de réacteurs. L'objectif ultime de cette phase est de faire converger les codes, normes et objectifs de sûreté des pays participants. La troisième phase, qui est une entreprise de beaucoup plus long terme, mettra à profit les enseignements des phases précédentes pour faciliter la délivrance des autorisations pour les concepts de réacteurs de quatrième génération.

Certains pays ont pris des initiatives nationales pour évaluer les problèmes réglementaires que la transition vers les systèmes à neutrons rapides et identifier des solutions possibles. Les États-Unis, par exemple, doivent modifier leur *Code of Federal Regulations* (CFR – code de réglementation fédérale) pour prendre en compte les installations de retraitement et de recyclage du combustible, établir un processus d'autorisation en une seule étape et intégrer certaines exigences en matière de sécurité et de garanties. Le cadre réglementaire doit être modernisé pour le rendre plus efficace (réduire les délais d'attribution des autorisations). Ceci implique pour l'USNRC un besoin accru de moyens pour pouvoir traiter les demandes d'autorisation pour les installations nécessaires dans un cycle du combustible fermé.

Toujours aux États-Unis, le cadre législatif et réglementaire devra aussi être modifié pour autoriser le stockage définitif d'éléments transuraniens issus du recyclage commercial. En outre, compte tenu de la récente proposition de créer un organisme de gestion des déchets public ou quasi-public, le *Nuclear Waste Policy Act* (NWPA) de 1982 devra être modifié pour permettre la création et le financement des activités de cet organisme.

Le document USNRC SECY-07-0081 (de mai 2007) de l'USNRC expose les grandes lignes d'un cadre réglementaire d'autorisation des installations proposées dans ce cadre de GNEP. Il y est recommandé d'établir les documents techniques en prévision de la rédaction d'une règle à intégrer à la partie 70 du titre 10 du CFR et d'analyser les lacunes de la partie 50 pour régler la question des installations de retraitement et des réacteurs incinérateurs avancés. La partie 52 pourrait aussi devoir être modifiée pour y intégrer la technologie des réacteurs à neutrons rapides au sodium. Il a donc été demandé au personnel de l'USNRC (USNRC SECY-07-0198, novembre 2007) : d'effectuer une analyse des lacunes de toute la réglementation de l'USNRC, d'identifier les changements à y apporter pour permettre l'autorisation d'installations de retraitement ou de réacteurs de recyclage avancés, et de rédiger des documents techniques nécessaires à l'adoption d'une règle à intégrer à la partie 70 du titre 10 du CFR en révisant si besoin est la partie 50 du titre 10 du CFR.

Si les systèmes à neutrons rapides déployés pendant la période de transition posent des questions spécifiques du point de vue de la résistance à la prolifération et de la protection physique, ils ne créent pas plus de problèmes à cet égard que les systèmes à réacteurs thermiques. Sous réserve que les bonnes mesures intrinsèques et extrinsèques soient prises pour garantir la protection physique et la non-prolifération, tous les systèmes nucléaires peuvent être exploités avec une assurance raisonnable que les matières et les technologies ne seront pas utilisées de façon abusive à des fins non civiles.

L'un des objectifs des travaux méthodologiques du GIF est de faciliter la résistance à la prolifération et la protection physique « dès la conception », c'est-à-dire d'intégrer les spécifications de résistance à la prolifération et de protection physique dès les premières étapes de la conception d'un système. La méthodologie établie dans ce contexte et testée sur des réacteurs à neutrons rapides au sodium « hypothétiques » est un moyen fiable d'évaluer les caractéristiques d'un système avancé propres à garantir sa résistance à la prolifération et sa protection physique.

4.4.3 Politique de gestion des déchets

Dans tous les pays de l'OCDE, les propriétaires/exploitants d'installations nucléaires sont responsables de la gestion et du stockage des déchets radioactifs, et de l'accumulation de fonds suffisants pour ces opérations. Il revient en revanche aux pouvoirs publics d'établir un cadre législatif et une réglementation spécifique applicable à chaque catégorie de déchets. En vue de la période de transition, ils devront adapter le contexte réglementaire aux nouveaux types et volumes de déchets résultant du déploiement de systèmes à neutrons rapides.

Par ailleurs, les États ont pour tâche de définir des stratégies à long terme couvrant les différents aspects du traitement et du stockage définitif des déchets, y compris, par exemple, la reconnaissance que la réduction des volumes et de la radiotoxicité des déchets ainsi que la réversibilité des méthodes de stockage génèrent des avantages pour la société.

En France, par exemple, la loi de 1991 sur la gestion des déchets a défini le cadre législatif de gestion des déchets de haute activité. Elle établit les besoins en R-D et définit trois axes de recherche :

- séparation et transmutation ;
- stockage dans des formations géologiques profondes ;

- entreposage de longue durée en (sub)surface.

Un rapport de synthèse évaluant les voies de R-D les plus prometteuses a été soumis aux autorités françaises en 2005. Après quoi, le cadre législatif français applicable à la gestion des déchets a été révisé, avec le vote en 2006 de deux lois importantes.

La loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire a créé une nouvelle Autorité de sûreté nucléaire indépendante. Cette autorité assure le contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection afin de protéger les travailleurs, les malades, le public et l'environnement des risques liés à l'utilisation des technologies nucléaires.

La loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs s'applique à tous les types de déchets radioactifs (et non seulement aux déchets de haute activité à vie longue). Elle définit trois grands principes applicables aux substances et déchets radioactifs : réduction de leur volume et de leur toxicité, entreposage des substances radioactives et stockage définitif des déchets en formations géologiques profondes. Elle établit également les modes de financement de la recherche, les charges de démantèlement des centrales et de nouvelles contributions des installations nucléaires pour financer les programmes de recherche. Elle définit précisément certains termes tels que matières radioactives et déchets radioactifs, et spécifie que le traitement est le moyen de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets nucléaires. L'une des mesures phares est la création d'un Plan national de gestion qui définit les solutions, les objectifs et les actions de recherche à mener pour atteindre ces objectifs. Ce plan est mis à jour tous les trois ans et publié conformément à la loi relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire.

Aux États-Unis, c'est l'État fédéral qui est actuellement responsable du stockage du combustible usé. Les exploitants de centrales nucléaires versent chaque année l'équivalent d'un dixième de cent par kWh à un *Nuclear Waste Fund* (fonds pour les déchets nucléaires). Quelles que soient les stratégies nationales et scénarios futurs en matière de production électronucléaire, on sait que le pays aura besoin d'un dépôt géologique permanent de stockage du combustible usé ou des déchets de haute activité. Par conséquent, la planification du dépôt de Yucca Mountain se poursuit, l'hypothèse étant faite que la limite des 70 000 tonnes de métal lourd fixée pour le site par le *Nuclear Waste Policy Act* sera atteinte. Dans ces conditions, tout volume supplémentaire de combustible usé ou de DHA pourrait aussi être stocké dans un dépôt géologique : soit dans une extension de celui de Yucca Mountain (si le *Nuclear Waste Policy Act* est modifié et que la limite imposée au premier stockage est supprimée), soit dans un autre dépôt géologique, sur un site restant à identifier. Si les États-Unis décident de fermer leur cycle du combustible, la quantité d'éléments transuraniens dans les DHA pourrait être substantiellement réduite, ce qui augmenterait en conséquence la capacité de stockage du dépôt.

Bien qu'il n'y ait actuellement aucun débat autour de la question, il n'est pas inconcevable d'imaginer qu'un dépôt de déchets nucléaires puisse être placé sous contrôle privé. Une telle solution limiterait les fonds publics à investir (même si, au moins dans un premier temps, l'aide et les incitations de l'État resteraient nécessaires), mais ne supprimerait pas les difficultés rencontrées lors de la sélection du site de stockage américain (l'opposition locale étant un facteur très important). Dans tous les cas, la sécurité à long terme du dépôt pourrait encore être à la charge du gouvernement fédéral ou, au minimum, nécessiter un contrôle réglementaire fédéral.

Certains groupes d'industriels ont proposé à l'État fédéral d'établir une nouvelle entité publique (USDOE, 2008a et 2008b) ou quasi-publique (USDOE, 2008c) chargée de gérer le combustible et les déchets comme une entreprise commerciale. Une telle organisation pourrait être créée sur le modèle de l'entreprise fédérale *Tennessee Valley Authority* (première compagnie d'électricité publique du pays). Elle serait financée par les contributions des compagnies d'électricité au *Nuclear Waste Fund*, qui se

substitueraient aux fonds existants, mais pourrait augmenter le montant de la contribution versée par les électriciens. Ses premières sources de revenus seraient les taxes sur les déchets et les recettes du recyclage des matières récupérées. Elle pourrait être responsable de la construction et de l'exploitation du dépôt de stockage et sous-traiter à des industriels du secteur la construction et l'exploitation d'installations de recyclage ainsi que le transport des matières nucléaires usées des réacteurs aux installations de recyclage. Les groupes d'industriels à l'origine de cette proposition ont précisé que la communauté des électriciens exploitants de centrales nucléaires est favorable à ce genre de projet. Les compagnies d'électricité seraient les principaux membres du conseil d'administration de l'entité et assureraient le contrôle des opérations commerciales nécessaire pour s'assurer que les fonds sont bien employés.

4.4.4 Action publique

Les principaux objectifs des scénarios de transition sont d'augmenter l'efficacité des systèmes nucléaires en optimisant l'utilisation des ressources naturelles et d'alléger le fardeau que représentera à long terme le stockage des déchets radioactifs de haute activité. Ces objectifs renvoient à des préoccupations sociales auxquelles les pouvoirs publics peuvent vouloir répondre en prenant des mesures en faveur de systèmes nucléaires à base de réacteurs à neutrons rapides.

Pour les États, cependant, il s'agit de concevoir des mesures en faveur des technologies avancées, telles que les systèmes à neutrons rapides ou les énergies renouvelables, sans empêcher les mécanismes du marché de s'exercer normalement. Bien que la mission puisse paraître difficile, il existe de nombreux exemples de mesures gouvernementales efficaces et bien pensées qui sont adoptées pour favoriser des solutions non concurrentielles afin d'améliorer la sécurité d'approvisionnement en énergie et/ou de parer au changement climatique mondial.

En particulier, il existe un large éventail de mesures que les pouvoirs publics peuvent adopter pour faciliter le déploiement des systèmes à neutrons rapides, lorsque ces systèmes sont jugés avantageux pour la société. Les mesures à prendre dépendent de nombreux facteurs et critères et diffèrent selon les principaux objectifs stratégiques de chaque pays.

Si un pays a pour objectif principal de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets, un mécanisme similaire à celui des taxes et/ou permis d'émission de carbone adoptés dans certains pays peut mettre en évidence la valeur sociale de l'incinération des actinides. Cette stratégie augmenterait le coût de l'électricité produite par les réacteurs thermiques associés à un cycle ouvert et rendrait beaucoup plus attrayants les réacteurs à neutrons rapides incinérateurs d'actinides.

Souvent, l'obstacle déterminant à l'investissement dans les systèmes à neutrons rapides ne sera pas le coût du cycle du combustible associé, mais le risque lié au fait de financer une nouvelle technologie nucléaire, généralement beaucoup plus coûteuse en capital qu'un réacteur thermique à eau parvenu à maturité technique. L'aide des pouvoirs publics pourraient alors prendre la forme de prêts garantis et d'assurances en cas de retard de la procédure d'autorisation, comme le font actuellement les États-Unis dans le cadre de l'*Energy Policy Act* de 2005.

Bien d'autres mécanismes peuvent être mis en place pour permettre aux réacteurs rapides de s'implanter sur les marchés de l'électricité libéralisés, avant même d'être entièrement compétitifs. Ces mécanismes doivent bien sûr être compatibles avec les mécanismes du marché et, en définitive, profiter aux consommateurs et à la société dans son ensemble.

Références

CRS (2008), *Managing the Nuclear Fuel Cycle: Policy Implications of Expanding Global Access to Nuclear Power*, mis à jour le 7 mars 2008, Congressional Research Service, Washington, DC, États-Unis.

GIF (2008), *User's Manual for G4-ECONS Version 2.0*, GIF/EMWG/2008/002, AEN, Paris, France.

GIF (2007), *Cost Estimating Guidelines For Generation IV Nuclear Energy Systems, Revision 4.2*, GIF/EMWG/2007/004, AEN, Paris, France.

GIF, (2002), *Generation IV Roadmap*, USDOE, Washington, DC, États-Unis.

AIEA (2005), *Approches multilatérales du cycle du combustible nucléaire*, INFCIRC/640, AIEA, Vienne, Autriche.

AEN et AIE (2005), *Coûts prévisionnels de production de l'électricité : mise à jour 2005*, OCDE, Paris, France.

AEN (2008a), *Uranium 2007 : Ressources, production et demande*, rapport établi conjointement par l'AIEA et l'AEN, OCDE, Paris, France.

AEN (2008b), *La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire*, OCDE, Paris, France.

AEN (2007), *Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables*, OCDE, Paris, France.

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

USDOE (2008a), *GNEP Deployment Studies: Overall Summary Report*, DOE/NE/24503.1-1 Final Rev. 1, EnergySolutions, 19 mai 2008, Washington DC, États-Unis.
<http://www.gnep.energy.gov/pdfs/EnergySolutions%20Report.pdf>.

USDOE (2008), *Integrated U.S. Used Fuel Strategy*, – analyses de l'International Nuclear Recycling Alliance, présentées au ministère de l'Énergie sous le numéro DE-FC01-07NE24505, 1^{er} mai 2008, Washington DC, États-Unis.
<http://www.gnep.energy.gov/pdfs/INRA%20Report.pdf>.

USDOE (2008c), *Global Nuclear Energy Partnership Business Development Plan*, GE Hitachi, présenté au ministère de l'Énergie sous le numéro DE-FC01-07NE 24504, avril 2008, Washington DC, États-Unis. <http://www.gnep.energy.gov/pdfs/GE-Hitachi%20Report.pdf>.

USDOE (2008d), <http://www.gnep.energy.gov/pdfs/General%20Atomics%20Report.pdf>

USDOE (2006), <http://www.gnep.energy.gov/>

Chapitre 5

SCÉNARIOS ILLUSTRATIFS : PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET PRINCIPALES CONCLUSIONS

Le présent chapitre fait la synthèse des principales conclusions de plusieurs études de scénarios illustratifs. Il rappelle les objectifs de chaque étude, les résultats qui en étaient attendus et les enseignements qui en ont été tirés concernant les approches et problèmes stratégiques.

5.1 Contexte

Au début de l'année 2008, la puissance nucléaire installée dans le monde avoisinait les 370 GWe et l'on construisait des centrales représentant au total une vingtaine de GWe. La plupart des réacteurs de puissance actuels ont été raccordés au réseau dans les années 70 ou 80, à une époque où leur durée de vie était estimée entre 30 et 40 ans. Aujourd'hui, on prolonge la durée de vie de la majorité des réacteurs dont le remplacement devrait donc avoir lieu entre 2020 et 2050. Au cours de cette période, la puissance nucléaire installée totale devrait augmenter. À titre d'exemple, les scénarios de l'AEN (AEN, 2008) prévoient une puissance nucléaire comprise entre 400 et 620 GWe en 2030, et entre 580 et 1 400 GWe en 2050. Mais d'autres scénarios indiquent une croissance encore plus importante.

Avec les technologies actuelles des réacteurs thermiques, l'augmentation de la puissance nucléaire installée exploitée entraînerait une hausse proportionnelle de la demande d'uranium et, d'ici le milieu du siècle, la consommation cumulée d'uranium serait égale au volume des ressources en uranium identifiées aujourd'hui comme exploitables dans des conditions rentables et avec un impact environnemental acceptable. Cette hausse de la demande se répercuterait sans doute sur les prix et élargirait la base des ressources récupérables, mais l'extraction et le traitement de minerais à plus faible teneur en uranium pourraient avoir un impact négatif non seulement sur les coûts de récupération (et les prix) mais aussi sur l'environnement.

En aval du cycle, le stock de combustible usé est estimé à 200 000 tonnes environ et grossit à un rythme de 7 000 tonnes/an. Ce combustible usé doit être entreposé et finalement stocké s'il n'est pas retraité. La construction de dépôts ne pose pas de difficulté technique, mais les processus d'autorisation se sont révélés complexes et l'opposition des communautés locales reste un problème pour la plupart des projets en cours. En outre, le combustible usé contient des matières fissiles et fertiles valorisables, comme le plutonium et l'uranium, qui peuvent servir dans des réacteurs à neutrons rapides.

C'est la volonté de résoudre l'un de ces deux problèmes fondamentaux, voire les deux – la gestion des ressources en uranium et celle du combustible usé – qui conduit à décider d'appliquer des scénarios de fermeture progressive du cycle du combustible pour mieux gérer les matières fissiles et fertiles. La conception de ces scénarios et les critères de leur évaluation varient en fonction de celui des deux problèmes que l'on a jugé prioritaire. La mise en œuvre et l'évaluation des scénarios de transition peuvent s'inscrire dans deux situations caractéristiques contrastées :

- nécessité de gérer le combustible usé (priorité donnée à la gestion des déchets), sans contrainte particulière concernant la disponibilité de l'uranium ;

- nécessité de mieux maîtriser l’approvisionnement en uranium (priorité donnée à la valorisation des matières fissiles contenues dans les ressources naturelles), du fait du manque de ressources accessibles et/ou de capacités de production.

Dans tous les cas, la stratégie appliquée et les options sélectionnées pour le cycle du combustible doivent être compatibles avec les objectifs de développement durable, dont l’amélioration de la sûreté, de la protection physique et de la résistance à la prolifération des armes nucléaires. Les différentes options possibles pour les futurs cycles du combustible sont les suivantes :

- pas de recyclage et stockage direct des assemblages combustibles usés, ce qui correspond au *statu quo* dans la plupart des pays ;
- transition comportant un déploiement limité de réacteurs rapides (critiques ou sous-critiques) de recyclage des éléments transuraniens, dans le but de réduire la masse, la charge thermique et la radiotoxicité des déchets ;
- transition vers des réacteurs rapides permettant un multirecyclage important des éléments transuraniens, du plutonium seul, du plutonium et de l’américium ou du plutonium et des actinides mineurs, dans le but de réduire les besoins en uranium ainsi que la masse, la charge thermique et la radiotoxicité des déchets.

5.2 Méthodologies d’étude des scénarios de transition

Les études de scénarios de transition ont généralement pour objet d’évaluer et d’analyser l’impact que le déploiement de réacteurs et cycles du combustible avancés peut avoir au cours du temps sur les bilans de matières fissiles, les besoins en uranium et en services du cycle du combustible, ainsi que les rejets et les doses de radioactivité, en fonction de l’évolution de la puissance nucléaire installée et de la production d’électricité. En faisant varier la conception des scénarios de transition, on peut optimiser certaines caractéristiques de fonctionnement des systèmes telles que le facteur de conversion des réacteurs (cœur surgénérateur ou incinérateur) et les besoins en matières fissiles.

Les calendriers de transition dépendent de la disponibilité technique et commerciale des réacteurs et installations du cycle indispensables pour atteindre les objectifs des scénarios envisagés. S’il est prévu d’ajouter des systèmes de quatrième génération au parc électronucléaire, le déploiement de systèmes de taille industrielle sur le marché ne peut pas intervenir avant 2040, en particulier dans le cas des réacteurs à neutrons rapides nécessitant des installations du cycle du combustible avancées. C’est sur plusieurs décennies qu’il faut planifier la transition des réacteurs existants vers des systèmes capables de recycler les transuraniens, tout en sachant bien qu’elle ne sera pas totalement achevée avant la seconde moitié du siècle. Quant aux installations du cycle du combustible avancées, elles doivent être planifiées en temps voulu pour que les capacités de traitement requises à toutes les étapes du cycle du combustible (par exemple, fabrication et retraitement) soient disponibles dès que nécessaire.

En général, les études de scénarios de transition situent le déploiement des nouveaux systèmes à cycle fermé après 2040. Certaines, mais pas toutes, prévoient également une phase préalable avec recyclage partiel du plutonium et de l’uranium, si bien que l’introduction d’installations de traitement du combustible usé peut intervenir ou non au cours de la période antérieure à la mise en service des réacteurs rapides.

Les études de scénarios de transition comportent généralement deux étapes :

- élaboration d’un scénario de référence comptabilisant les stocks de matières, installations du cycle du combustible et réacteurs initiaux ;

- évaluation de solutions de remplacement (variantes des scénarios) en fonction de différents paramètres et hypothèses concernant l'avenir : renouvellement des réacteurs existants et déploiement de nouveaux systèmes (installations du cycle et réacteurs).

Les critères de comparaison des différentes options recouvrent : les dates auxquelles les systèmes considérés seront parvenus à maturité et déployés, leur faisabilité technique et industrielle ; la consommation d'uranium (et d'autres ressources naturelles) ; l'impact sur la gestion des déchets (nombre et taille des dépôts nécessaires) ; la compétitivité économique ; la non-prolifération.

L'évaluation d'un scénario de transition se fait en fonction de la disponibilité des matières fissiles de l'existence et des capacités des dépôts de stockage de déchets. Les performances des systèmes, notamment le facteur de conversion et les besoins en matières fissiles, peuvent être optimisées selon les scénarios.

Les études de scénarios de transition présentées ci-après sont examinées sous deux angles :

- stock initial de matières et capacité des installations du cycle et réacteurs ;
- description des hypothèses et paramètres concernant l'avenir, en particulier calendrier de renouvellement des réacteurs existants et de déploiement de nouveaux systèmes (réacteurs et installations du cycle du combustible).

5.3 Présentation générale de quelques scénarios illustratifs

Plusieurs études de scénarios de transition réalisées pour différents pays ou régions ont été passées en revues et analysées afin d'en évaluer les principales conclusions en termes de politique à suivre. Les scénarios retenus pour illustrer cette section sont représentatifs d'objectifs et de contextes variés. Leurs principales caractéristiques et conclusions sont résumées ci-après.

5.3.1 Scénario régional¹

Les scénarios de transition peuvent offrir de meilleures perspectives lorsqu'ils sont conçus pour une région entière au lieu d'un seul pays, puisque l'extension de la zone géographique offre davantage de souplesse dans les délais, un meilleur accès aux ressources et aux installations et la possibilité de réaliser des économies d'échelle.

Pour mettre en œuvre des scénarios de transition régionaux ou internationaux, il faut disposer d'installations du cycle ou de centres régionaux que puissent partager des pays voisins. Cela suppose d'agrandir les structures existantes dans les régions déjà équipées ou de concevoir et de construire de nouvelles structures dans l'un des pays participants s'il s'agit d'une région encore non équipée. Les réacteurs rapides et les cycles fermés avancés pourraient donc n'être déployés que dans des pays dotés de grands programmes nucléaires dynamiques.

Cette approche débouche sur plusieurs possibilités :

- Certains pays pourraient choisir de maintenir à niveau constant ou d'arrêter progressivement leur production électronucléaire et de confier la gestion de leur combustible usé aux centres régionaux situés dans les pays dotés de grands programmes nucléaires.

1. Cette section s'inspire d'une note, préparée pour le groupe d'experts, sur le programme PATEROS entrepris dans le cadre des projets de la Commission européenne (Monti, 2008), et de Salvatores, 2008.

- Les pays dotés de grands programmes nucléaires pourraient convenir de brûler le plutonium et les actinides mineurs du combustible usé de pays ayant décidé d'arrêter leur production électronucléaire, mais aussi de pays ne souhaitant pas mettre en place un cycle fermé et ayant choisi de conserver leurs systèmes à réacteurs thermiques.

Ultérieurement, les pays aux programmes nucléaires interrompus ou stationnaires pourraient envisager le nucléaire de façon plus positive (pour des raisons économiques, environnementales ou de sécurité) et déployer des réacteurs et installations du cycle du combustible avancés. Ils pourraient alors assumer certains des rôles uniquement tenus, à l'origine, par les pays aux programmes nucléaires dynamiques.

Les pays sans secteur nucléaire pourraient souhaiter construire des installations électronucléaires pour des raisons économiques, environnementales ou de sécurité. Ils pourraient avoir besoin de l'appui des centres régionaux dans un premier temps, puis décider d'héberger eux-mêmes des centres régionaux, jouant ainsi un rôle différent au cours du temps.

En modifiant les proportions relatives de chaque catégorie de pays, il est possible d'élaborer divers scénarios. En général, les scénarios de régionalisation devraient constituer une approche plus efficace pour gérer le combustible nucléaire usé et renforcer la sécurité des matières nucléaires. Bien évidemment, il faudrait que tous les pays participants s'engagent à respecter les lois et réglementations internationales conçues pour garantir la sécurité et la sûreté des transports de larges volumes de matières nucléaires.

5.3.2 Scénarios relatif aux parts de marché des réacteurs avancés en Europe

Une étude réalisée par le Centre de recherche de la Commission européenne de Petten (Roelofs, 2008) a évalué la future composition, par type de réacteur, du parc électronucléaire des 27 États membres de l'Union européenne. Les systèmes considérés sont les suivants : SFR surgénérateurs ou autosuffisants (c'est-à-dire produisant leur propre combustible) ; REO de troisième génération brûlant du combustible à mélange d'oxydes (REO-MOX) ; réacteurs de quatrième génération dont les concepts sont évalués au plan international. L'analyse couvre une période de 100 ans. Le scénario tient compte de la durée de vie des centrales actuellement en service et fait l'hypothèse d'une croissance modeste de la production électronucléaire. Par conséquent, il est supposé que les réacteurs existants sont pour la plupart arrêtés entre 2020 et 2025. Le choix des réacteurs de remplacement est motivé d'abord par des considérations économiques internes au secteur nucléaire, puis par les contraintes liées à la date de déploiement des réacteurs rapides (après 2030).

Plusieurs scénarios associés à différents coûts de l'amont et de l'aval du cycle du combustible ont été évalués. Les résultats sont les suivants :

- Jusqu'en 2030, tout nouveau réacteur de puissance installé est nécessairement un modèle de troisième génération, qui peut éventuellement brûler du combustible MOX.
- Les réacteurs rapides surgénérateurs ou autosuffisants sont intéressants lorsqu'on suppose des coûts du cycle du combustible plus élevés. Les surgénérateurs le sont plus encore lorsque les coûts de l'amont du cycle augmentent car ils consomment plus efficacement le minerai d'uranium.
- Bien que l'on considère souvent que les coûts de production d'électricité d'origine nucléaire dépendent essentiellement des coûts en capital, certains scénarios montrent que cette hypothèse n'est pas toujours vraie. Les coûts du cycle de certains systèmes avancés sont si importants qu'ils égalent voire dépassent les coûts en capital.

- La part des coûts du cycle dans les coûts de production totaux est presque constante pour tous les réacteurs rapides des scénarios considérés, ce qui met en lumière l'intérêt des réacteurs rapides dans les scénarios prévoyant une augmentation des coûts de l'amont du cycle des réacteurs thermiques.

5.3.3 *Cas d'un petit pays (République tchèque)*

Le déroulement possible de la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides dans un petit pays a été étudié dans le cas de la République tchèque (Vocka, 2008). À l'heure actuelle, la République tchèque compte six réacteurs nucléaires – quatre VVER-400 et deux VVER-1000 – qui produisent ensemble environ 25 TWh (soit 31 % de la production d'électricité totale du pays en 2006). L'étude réalisée privilégie les flux et les bilans matières. On part de l'hypothèse que la contribution du nucléaire à l'approvisionnement énergétique total doublera d'ici 2040 pour ensuite rester stable jusqu'à la fin du siècle. On suppose également que les nouveaux réacteurs construits jusqu'en 2040 sont des REP, puis que des surgénérateurs avancés sont progressivement déployés, ce déploiement dépendant de la quantité de plutonium récupérée dans le combustible utilisé des réacteurs thermiques (VVER et REP).

L'impact du délai entre le déchargement du combustible utilisé des réacteurs thermiques et le chargement du combustible plutonium dans les réacteurs rapides a été évalué. L'étude montre qu'il peut être très difficile de déployer des surgénérateurs rapides dans un pays où le nombre de réacteurs en service et les réserves de plutonium contenu dans le combustible utilisé sont limitées, et que la cadence de déploiement des RNR dépend fortement du calendrier de retraitement et de recyclage du combustible utilisé. Avec un délai de 15 ans entre le déchargement du combustible utilisé et le chargement du combustible MOX dans les RNR, la République tchèque ne pourrait mettre en service qu'un seul surgénérateur rapide avant 2050 et elle ne pourrait passer à un parc exclusivement constitué de RNR pendant le 21^e siècle. En revanche, si ce délai était de 7 ans, le pays pourrait effectuer sa transition avant la fin du siècle. Dans les deux cas, la transition vers les systèmes à neutrons rapides exigerait de retraiter un volume important de combustible utilisé (l'étude suppose une capacité de retraitement illimitée).

5.3.4 *Études canadiennes sur le rôle potentiel des réacteurs à eau lourde*

Le programme électronucléaire canadien repose sur la technologie CANDU® dont la flexibilité permet d'intégrer les réacteurs à différents cycles du combustible. Les caractéristiques des réacteurs CANDU, à savoir grande économie neutronique, tubes de force renfermant le combustible, possibilité de recharger le combustible en service et conception simple des grappes de combustible, permettent d'optimiser divers types de cycles du combustible.

Énergie atomique du Canada limitée (EACL) étudie activement les cycles du combustible CANDU qui mettent à profit les synergies entre réacteurs CANDU modérés à l'eau lourde et REO ou RNR. L'optimisation des scénarios de transition nécessite de bien exploiter ces synergies.

Selon les travaux de recherche canadiens, les caractéristiques spécifiques des réacteurs à eau lourde peuvent se révéler extrêmement utiles et compléter avantageusement celles des réacteurs à eau ordinaire pendant la période de transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides. Les réacteurs à eau lourde pourraient être utilisés pour adapter la taille du parc électronucléaire à la demande d'électricité. Ils consomment efficacement les matières fissiles et peuvent contribuer à la gestion des stocks d'actinides mineurs.

Dans un scénario de transition où les quantités de matières fissiles sont limitées et où les réacteurs rapides ont de faibles facteurs de surgénération, il pourrait se révéler plus difficile d'accroître la taille du parc de réacteurs rapides pour répondre à la hausse de la demande d'électricité. Dans ce cas, un parc composé de quelques réacteurs à eau lourde pourrait être le moyen le plus efficace de convertir l'uranium en plutonium fissile utilisable comme premier cœur des RNR de la prochaine génération. Si le scénario prévoit que ce plutonium a été obtenu par retraitement du combustible usé des REO, l'introduction d'un petit nombre de réacteurs à eau lourde permettrait de convertir l'uranium de retraitement des REO en plutonium et en uranium appauvri consommables dans les RNR, tout en produisant de l'électricité.

Grâce à leur économie neutronique élevée, les réacteurs à eau lourde peuvent produire une grande quantité d'énergie avec peu de matières fissiles. Dans les scénarios de déploiement de RNR à facteur de conversion élevé, la production nette de plutonium dépasserait la demande due à l'expansion du parc de RNR. Dans ce cas, un réacteur à eau lourde pourrait efficacement convertir le surplus de plutonium en électricité, dans un cycle MOX plutonium-uranium ou un cycle plutonium-thorium, sans incidence ou presque sur les ressources en uranium. Associés de tels cycles, les réacteurs à eau lourde exploiteraient plus efficacement que les REO l'énergie du plutonium et de l'uranium.

Dans certaines situations, la transition vers les RNR pourrait aussi être décidée pour limiter les besoins de stockage de combustible usé. Si l'on veut diminuer le volume de stockage nécessaire, il faut en effet réduire la chaleur résiduelle du combustible usé et, en particulier, sa teneur en actinides mineurs.

5.3.5 Scénario de transition de la France

Les études nationales des scénarios de gestion des matières nucléaires sont actuellement conduites dans le cadre de la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Elles devraient s'achever en 2012, leurs résultats devant appuyer le processus décisionnel concernant l'avenir de la production électronucléaire française.

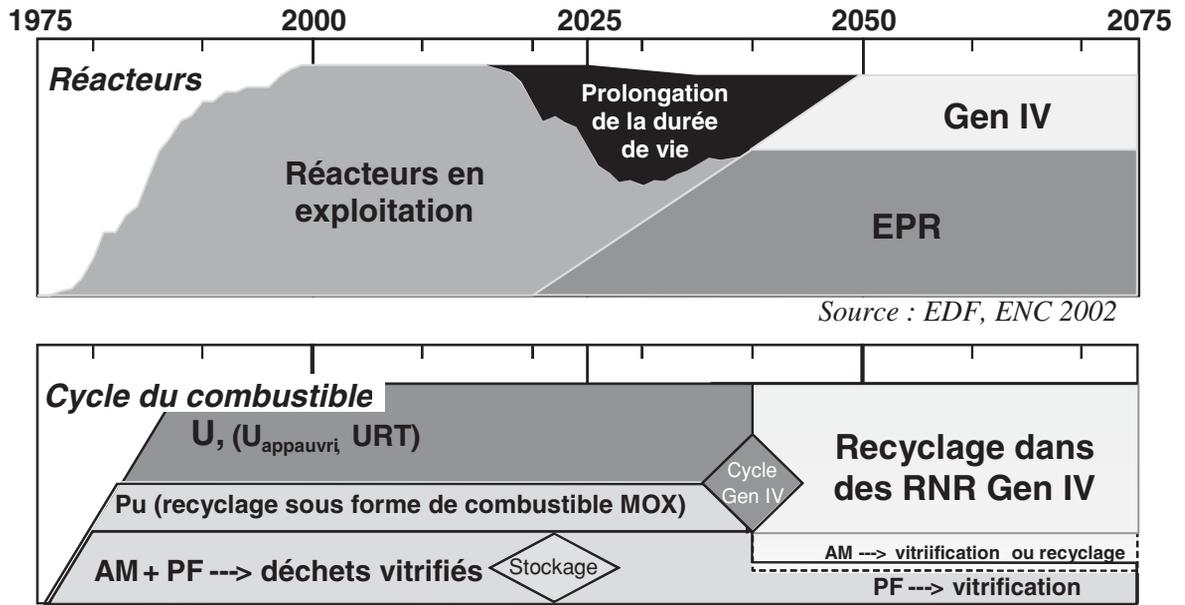
La stratégie appliquée par la France met à profit les installations du cycle existantes et l'expérience industrielle du pays. Au total, 22 700 tML de combustible usé ont été retraitées et quelque 1 100 tML de combustible MOX ont été produites et chargées dans les 20 REP autorisés à utiliser ce type de combustible. Ce recyclage du plutonium dans les REP a permis de diviser par 7 le volume de combustible usé entreposé et d'abaisser d'environ 10 % la consommation d'uranium naturel.

La transition envisagée, illustrée à la figure 5.1, consiste à renouveler le parc électronucléaire existant, composé de réacteurs à eau ordinaire, à partir de 2020. Les réacteurs déployés seront, dans un premier temps, des réacteurs à eau sous pression évolutionnaires de troisième génération (EPR) puis, à partir de 2040, des réacteurs rapides de quatrième génération. Ce scénario suppose la construction d'une nouvelle génération de réacteurs et d'installations du cycle du combustible, y compris une installation de recyclage-fabrication intégrée.

La puissance nucléaire installée est, dans les études, fixée à 60 GWe et prévue pour rester constante. Les hypothèses suivantes sont également faites :

- prolongation de la durée de vie des centrales (jusqu'à 50 ans en moyenne) ;
- renouvellement du parc existant avec des EPR de 2020 à 2040 (2 GWe/an, soit 40 GWe au total) ;
- déploiement de SFR après 2040 (20 GWe).

Figure 5.1 Scénario de transition et déploiement de réacteurs en France



Source : Delpéch *et al.*, 2007.

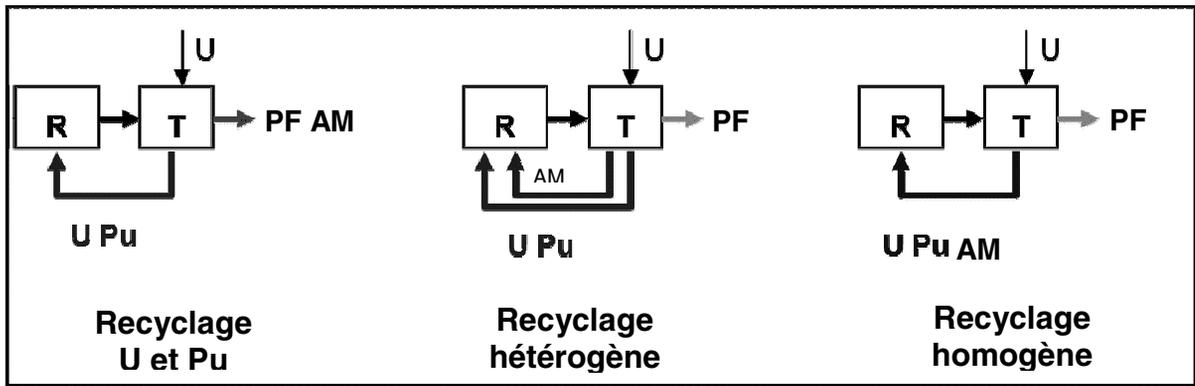
Le concept de GFR de quatrième génération est étudié comme alternative au SFR. Les études visent à comparer les différentes options de gestion des matières nucléaires dans des analyses détaillées des combustibles et réacteurs, des procédés de recyclage et du volume de stockage des déchets requis pendant la période de transition.

Les différentes options de gestion des matières nucléaires après 2040 sont présentées à la figure 5.2. Trois grandes stratégies sont examinées pour le long terme, avec pour objectif d'identifier des solutions techniquement réalisables et économiquement acceptables et de faciliter la prise de décision en temps utile :

- optimisation du recyclage de l'uranium et du plutonium dans les REP existants et les futurs EPR dans un premier temps, puis cogestion de l'uranium, du plutonium et éventuellement du neptunium dans des SFR (procédé COEXTM) ;
- recyclage hétérogène des actinides mineurs, dans les assemblages fertiles de SFR avec une teneur en AM généralement comprise entre 10 et 15 % en masse, ou dans les cibles de systèmes hybrides avec une teneur en AM comprise entre 40 et 50 % ;
- recyclage homogène des actinides mineurs dans les combustibles nourriciers de SFR (faible teneur en AM, de l'ordre de 2.5 % en général).

Les premiers résultats indiquent que le remplacement de tous les REP par des RNR pourrait être achevé avant la fin du siècle. Le stock disponible de plutonium pourrait alimenter un parc de RNR d'une puissance de 60 GWe d'ici 2090. En outre, il est possible de maintenir à niveau constant, à près de 1 100 tonnes/an, les capacités de traitement de combustible usé pendant la transition, c'est-à-dire entre 2040 et 2100. L'usine de retraitement gèrerait les combustibles UOX et MOX usés des REO pendant les deux premières décennies de la transition, puis le MOX des RNR avec les combustibles UOX usés.

Figure 5.2 Options de gestion future des matières nucléaires



Note : R = réacteur ; T = installation de séparation/fabrication.

Source : Delpech *et al.*, 2007.

5.3.6 Scénarios de transition du Japon

Le Japon importe la majeure partie de l'énergie qu'il consomme ; son approvisionnement énergétique est donc fragile. Pour accroître son indépendance, le pays développe sa puissance électronucléaire depuis 50 ans. Il exploite actuellement 55 centrales (32 REB, dont 4 avancés, et 23 REP), d'une puissance installée cumulée de près de 50 GWe. Un REB avancé et un REP sont en construction et onze autres centrales en cours de planification. Le parc électronucléaire fournit 16 % de l'énergie primaire et un tiers de l'électricité du pays, ce qui a permis au Japon de réduire ses importations d'énergie. Le nucléaire est aussi un moyen pour le pays d'atteindre ses objectifs en matière de lutte contre le changement climatique, en réduisant les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie. Selon le document japonais « *Long-Term Outlook for Energy Supply and Demand* » (ACNRE/METI, 2005), la puissance nucléaire devrait progresser jusqu'à 58 GWe en 2030 (contre 50 GWe aujourd'hui) puis rester constante les années suivantes.

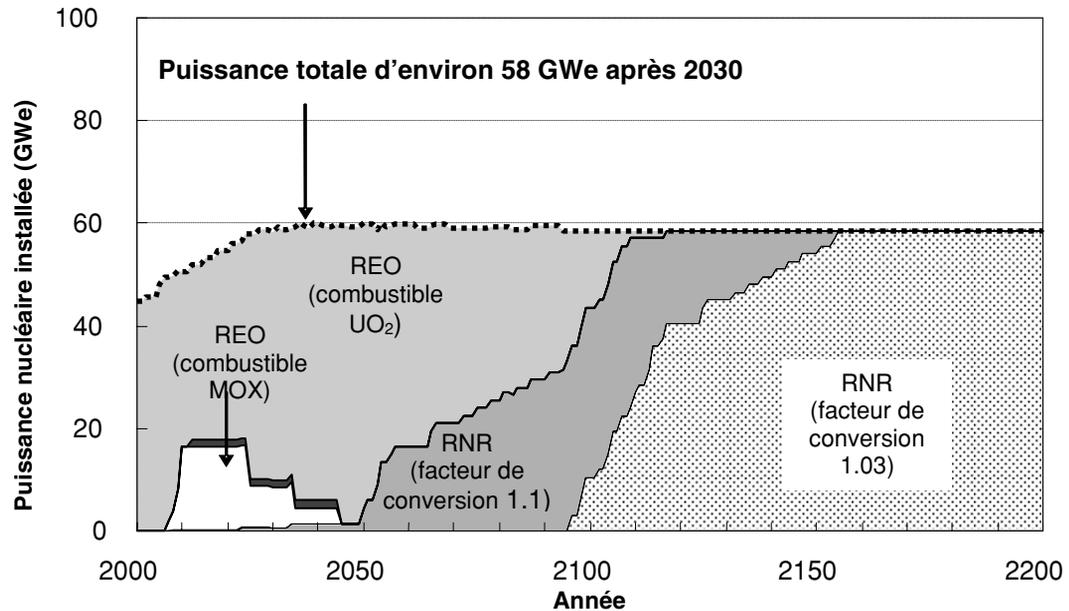
Le pays possède des usines d'enrichissement de l'uranium (capacité de 1 050 tUTS/an), des stockages de déchets radioactifs de faible activité, et des installations de retraitement du combustible (capacité de 800 tML/an, à Rokkasho). Une usine de fabrication de combustible MOX est en construction sur le site de Rokkasho. La politique nationale du Japon est de promouvoir la fermeture du cycle du combustible afin d'utiliser le plus efficacement possible les ressources en uranium et de diminuer la quantité de déchets radioactifs de haute activité. Dans un premier temps, le plutonium issu du retraitement du combustible utilisé des REO sera recyclé dans des REO sous forme de MOX. Le cadre législatif réglementant le stockage des DHA a été adopté en 2000. Les sites potentiels sont actuellement étudiés conformément à la loi, et la construction et l'exploitation des installations devraient commencer à la fin des années 2030 (Maeda, 2005).

Dans le cadre de sa stratégie de fermeture du cycle du combustible, le Japon prévoit de brûler les transuraniens dans des SFR sous forme de combustible MOX produit par un procédé avancé de retraitement aqueux suivi d'un pastillage simplifié. Les études des scénarios supposent un déploiement régulier de SFR exploités à l'échelle industrielle après 2050. Le recyclage du plutonium dans les REO sera interrompu avant la mise en service des RNR. Le plutonium et les AM récupérés lors du retraitement du combustible utilisé des REO autour de 2050 seront réutilisés dans les SFR. Les combustibles utilisés MOX déchargés des REO et des RNR seront retraités ensemble dans les mêmes usines. Le Pu et les AM extraits des combustibles MOX utilisés des REO seront également réemployés

dans des réacteurs rapides chargés en MOX. Les facteurs de conversion des RNR seront de 1,10 (surgénération) et 1,03 (isogénération) et il y aura transition des réacteurs surgénérateurs aux réacteurs isogénérateurs en fonction du bilan plutonium.

Le scénario de déploiement des RNR est représenté sur la figure 5.3. La transition des REO aux SFR devrait s'achever autour de 2110. Avec des SFR, il faudra environ 60 ans pour passer complètement des REO aux SFR, soit une période à peu près égale à la durée d'exploitation d'un REO. En appliquant cette stratégie, le Japon ne devrait plus avoir à importer d'uranium à partir du début du 22^e siècle.

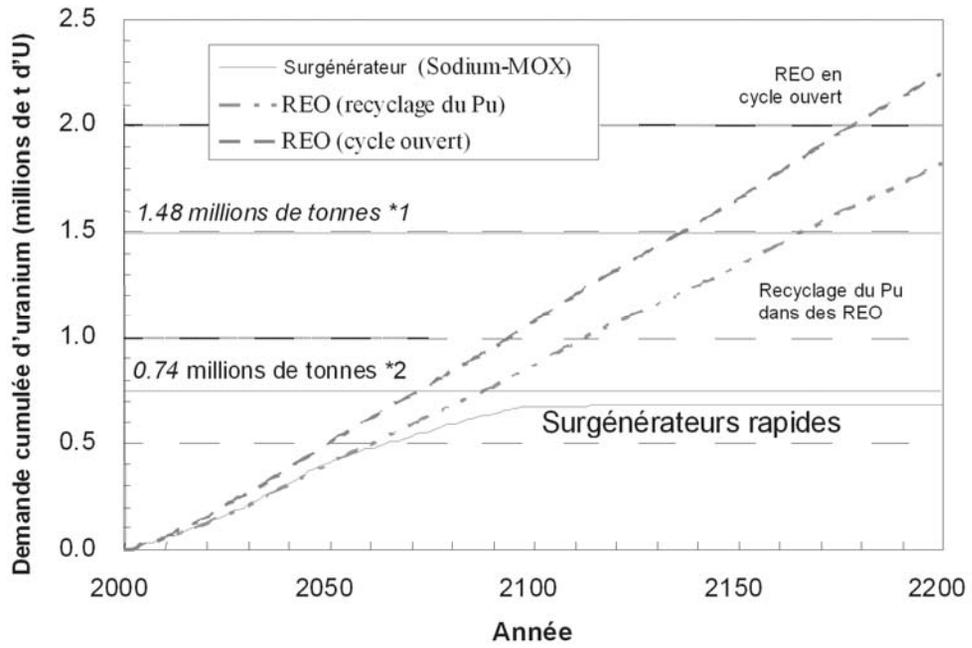
Figure 5.3 Scénarios de transition japonais



La figure 5.4 illustre l'évolution de la demande cumulée d'uranium naturel. Les scénarios avec REO en cycle ouvert et multirecyclage du Pu dans des REO donnent pour l'année 2200 une demande cumulée de respectivement 2,3 et 1,9 millions de tonnes d'uranium, pour un total des ressources classiques avoisinant 16 millions de tU (AEN, 2008). Par opposition, le scénario de déploiement de RNR ne nécessite que 0,7 million de tU (soit 4 % du total des ressources classiques). La demande d'uranium du Japon représente actuellement 10 à 15 % de la demande mondiale. Ce chiffre devrait tomber à environ 5 % au cours de la seconde moitié du siècle, du fait de l'augmentation de la production électronucléaire dans d'autres pays, d'Asie en particulier.

La figure 5.5 représente la quantité totale cumulée d'AM contenus dans les déchets de haute activité, qu'il s'agisse de combustible utilisé directement stocké ou de déchets vitrifiés dans le cas du recyclage du Pu. Si l'on stocke directement le combustible utilisé des REO (UO₂ et MOX), les actinides mineurs continuent de s'accumuler. L'accumulation des AM dans les déchets vitrifiés varie dans de fortes proportions selon que l'on choisit ou non de retraiter le combustible utilisé des REO et de recycler le Pu dans les REO (REO-MOX ou cycle ouvert). En revanche, dans le cas du déploiement de RNR, les AM issus du retraitement du combustible de REO étant recyclés dans les RNR, la quantité d'AM contenue dans les déchets se stabilise en dessous des 100 tML jusqu'au siècle prochain.

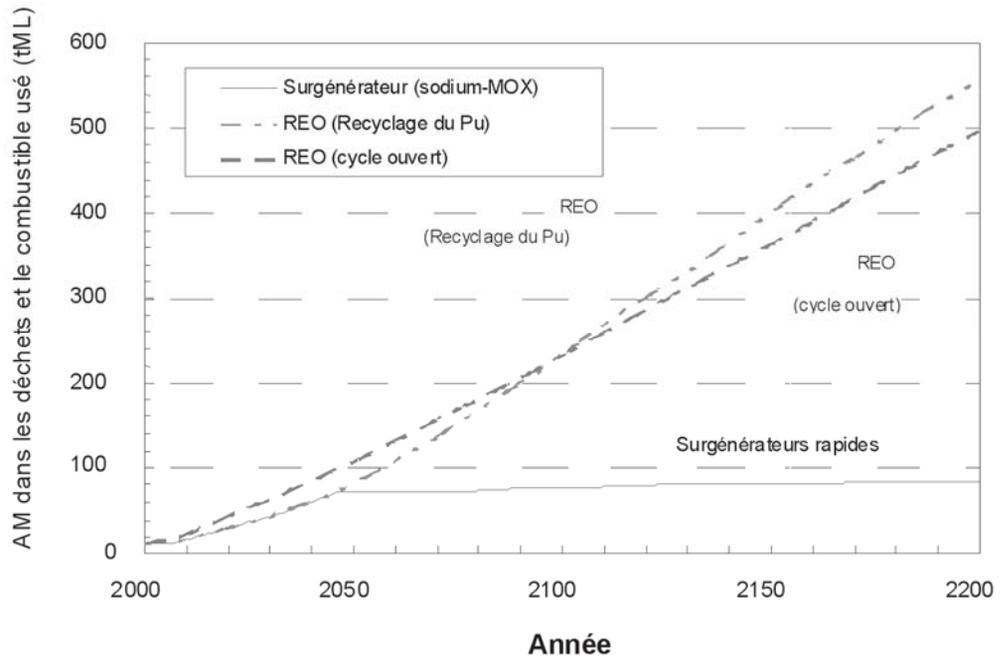
Figure 5.4 Demande cumulée d'uranium naturel (scénarios japonais)



*1 : 10 % du total des ressources classiques en uranium.

*2 : 5 % du total des ressources classiques en uranium.

Figure 5.5 Quantité cumulée d'AM dans les DHA (scénarios japonais)



5.3.7 Scénario de transition de la Fédération de Russie

Du fait de sa forte croissance économique ces dernières années, la Russie a vu sa demande d'énergie augmenter. Elle prévoit de la satisfaire principalement en développant sa puissance électro-nucléaire. Les principaux objectifs du développement du programme nucléaire russe sont les suivants :

- porter la part de la production électronucléaire dans la production d'électricité totale à 25-30 % d'ici 2030 puis 45-50 % d'ici 2050 ;
- fermer le cycle du combustible grâce à des réacteurs rapides surgénérateurs ;
- développer des utilisations non électrogènes de l'énergie nucléaire après 2030, en particulier la production de carburant de synthèse et d'hydrogène ;
- créer une infrastructure industrielle de gestion des déchets radioactifs (qui doivent être isolés de la biosphère de façon fiable) et de démantèlement des centrales et installations du cycle du combustible.

Un document (*The General Scheme for the Location of Electrical Energy Facilities being developed for the period to 2020*) définissant la stratégie générale d'implantation des installations de production d'électricité mises au point d'ici jusqu'en 2020 a été approuvé. Ce document propose de multiplier la production électronucléaire par facteur de 1,7 à 2 par rapport au niveau de 2007. Il explique également que la puissance nucléaire installée atteindra en 2020 33,4 GWe dans le scénario de développement modéré ou 39,4 GWe dans le scénario de fort développement. Une nouvelle stratégie russe de développement de la puissance électronucléaire jusqu'en 2050 est en chantier. La puissance installée totale envisagée pour 2050 est comprise entre 100 et 300 GWe.

Le développement de la nouvelle plateforme technologique requise en 2030 nécessite les travaux suivants :

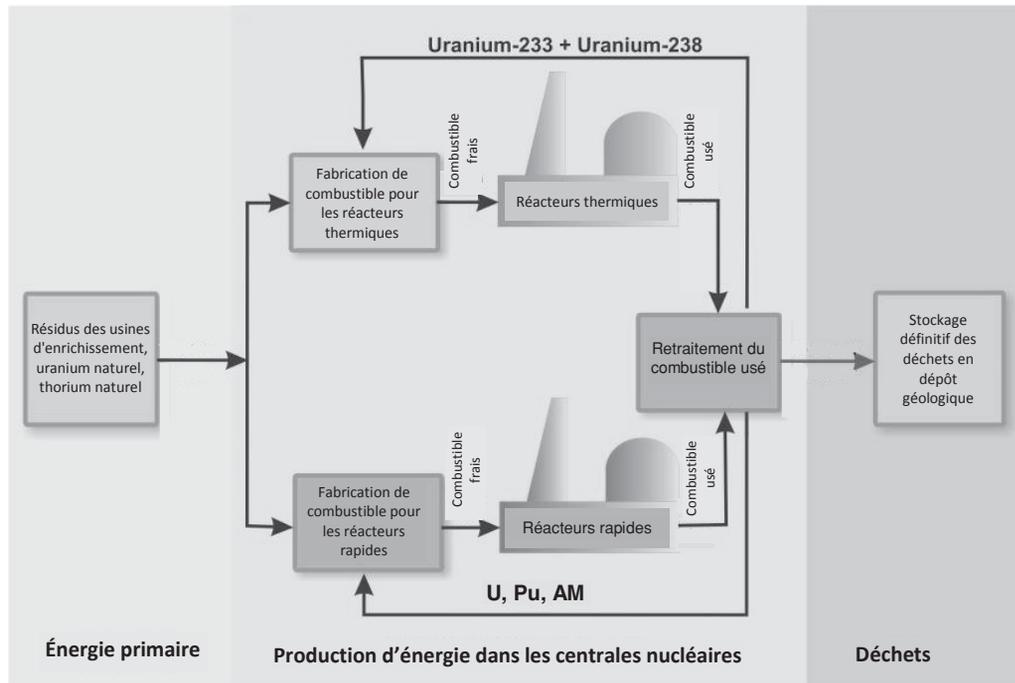
- mise en service du BN-800 (d'ici 2012) ;
- mise au point d'un procédé de séparation PUREX modifié et mise en service d'une usine commerciale de retraitement radiochimique du combustible usé des REO ;
- mise en service d'une usine commerciale de fabrication de MOX pour les premières séries de RNR surgénérateurs ;
- conception et construction de quelques surgénérateurs au sodium commerciaux de première génération ;
- travaux de R-D et démonstration de réacteurs (à caloporteurs plomb ou plomb-bismuth) et de technologies de recyclage de combustible innovants.

La figure 5.6 représente une structure possible du système nucléaire russe à l'équilibre dans la seconde moitié du 21^e siècle. Ce système nucléaire comprendrait des RNR surgénérateurs produisant à grande échelle du combustible à partir de ^{238}U et de ^{232}Th , des usines de retraitement pour le multi-recyclage du combustible, et une usine de fabrication de combustible pour les RNR.

Afin d'atteindre ces objectifs, le pays devra acquérir de nouvelles bases technologiques pour les RNR surgénérateurs commerciaux et le cycle du combustible fermé. À l'heure actuelle, un réacteur rapide, le BN-800 est en construction. Avec ses installations du cycle, il doit permettre la maîtrise des technologies des SFR et du cycle du combustible fermé, notamment la fabrication de combustible MOX, le retraitement du combustible usé et la fabrication de combustible à base d'actinides mineurs en vue de sa transmutation ultérieure dans des RNR. Le déploiement commercial des RNR est prévu pour après 2030. Dans l'intervalle, c'est la construction de réacteurs thermiques VVER avancés, la

filière russe dominante, qui devrait permettre d'augmenter la production électronucléaire. Compte tenu de la durée de vie de 50 ans de ces réacteurs, la transition vers les nouvelles bases et structures technologiques nucléaires devrait avoir lieu dans la seconde moitié de ce siècle.

Figure 5.6 Projet russe de système nucléaire innovant à l'équilibre



5.3.8 Scénarios de transition des États-Unis

Les scénarios de transition des REO aux réacteurs rapides avec cycle du combustible fermé sont évalués depuis quelques années dans le cadre du programme du ministère américain de l'Énergie consacré aux cycles du combustible avancés. Aucune approche n'ayant été sélectionnée, aucune série de résultats n'est présentée ici. Les études en cours apportent néanmoins des éclairages sur les paramètres les plus pertinents pour l'évaluation de la période de transition et sur les avantages potentiels de la transition pour le cycle du combustible et le stockage des déchets.

Les études américaines ont notamment abouti aux conclusions suivantes :

- Avec l'augmentation de la production électronucléaire, continuer d'exploiter comme aujourd'hui un cycle du combustible ouvert pourrait avoir des conséquences négatives, parmi lesquelles la multiplication substantielle des dépôts géologiques (en fonction de la capacité des sites), l'accumulation de plutonium de qualité réacteur dans le combustible usé et la valorisation insuffisante des ressources en uranium. Ces problèmes peuvent être résolus en fermant le cycle du combustible et en déployant des réacteurs rapides avancés (Yacout, 2005).
- Quand on évalue les scénarios de transition et leurs avantages, les hypothèses déterminantes sont le taux de croissance de la puissance nucléaire, la capacité des installations de séparation et le calendrier de leur déploiement (en particulier pour le combustible usé des REO), le délai entre le déchargement du combustible usé des REO et le chargement dans les RNR du plutonium de qualité réacteur issu du retraitement, la capacité de la banque de combustible s'il en existe une, et le facteur de conversion et le calendrier de déploiement des

RNR. Les études américaines envisagent des rythmes de croissance annuelle de la puissance nucléaire installée compris entre 0 % et 2,5 %. Certaines hypothèses prévoient le stockage des 63 000 premières Mt de combustible usé dans le dépôt de Yucca Mountain, d'autres non. Le début du déploiement des réacteurs rapides est généralement prévu à l'horizon 2030. Il est également le plus souvent supposé que les installations de démonstration et d'essai pourraient entrer en service d'ici 2025.

- Le stock de plutonium a un fort impact sur le déploiement des réacteurs à neutrons rapides et donc sur la contribution de ces réacteurs à la production électronucléaire totale.
- Les rapports entre la puissance des RNR et la puissance électronucléaire totale à l'équilibre dynamique et à l'équilibre statique pourraient être différents et très dépendants du délai entre le déchargement du combustible usé des REO et le chargement du plutonium dans les RNR.
- La plupart des analyses montrent que les REO seront utilisés pendant la majeure partie du 21^e siècle. Des facteurs de conversion plus élevés permettraient d'accroître à terme la proportion de réacteurs à neutrons rapides dans le parc mais réduirait la quantité de TRU éliminés. Cependant, cette pénalité pourrait être atténuée dans la mesure où la présence d'une proportion plus élevée de RNR dans le parc permet d'éviter la production de TRU qui aurait eu lieu dans les REO auxquels les RNR se substituent.

5.4 Enseignements des études de scénarios de transition

Plusieurs pays ou régions ont procédé à l'étude de scénarios de transition. Certains scénarios prévoient une transition complète des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides, débouchant sur un parc électronucléaire uniquement composé de RNR associés à un cycle du combustible fermé. D'autres, envisagent également le déploiement de systèmes intermédiaires de transmutation en réacteurs thermiques avant celui des réacteurs rapides.

Les systèmes intermédiaires pourraient être mis en service parallèlement au cycle du combustible rapide de façon à réduire au minimum les coûts des réacteurs de transmutation avancés, en particulier si les réacteurs rapides incinérateurs sont plus coûteux que les réacteurs thermiques. Cependant, les RNR incinèrent les actinides plus efficacement que les réacteurs thermiques et produisent en outre moins de déchets résiduels. En Europe (surtout en France) et au Japon, on recycle déjà ou on s'apprête à recycler le plutonium sous forme de MOX dans les REO. Cette option est également sérieusement envisagée aux États-Unis car elle permettrait de commencer à mettre en place le cycle du combustible avancé en attendant que les technologies d'incinération des transuraniens dans les réacteurs rapides soient au point.

5.4.1 Les réacteurs à eau resteront majoritaires pendant des décennies

Même dans les pays qui envisagent d'utiliser des RNR pour un recyclage avancé, les évaluations indiquent que les réacteurs de puissance refroidis à l'eau resteront une composante majeure de l'infrastructure nucléaire d'ici la fin du 21^e siècle, en particulier si leur durée de vie est prolongée jusqu'à 60 ans ou plus. Certains nouveaux REO et réacteurs à eau lourde, qui doivent être mis en service à l'horizon 2015-2040, seront opérationnels pendant la majeure partie du 21^e siècle.

5.4.2 Stratégies potentielles d'incinération des actinides ou de régénération de combustible

La transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides relève d'une stratégie à une seule strate lorsqu'elle est directe. Quand elle inclut la mise en service de réacteurs thermiques intermé-

diaires, elle est dite à double strate. Le tableau 5.1 présente quelques stratégies possibles à une seule strate ou à deux strates applicables à une infrastructure nationale initialement équipée de REO.

Tableau 5.1 Stratégies potentielles à un ou deux niveaux lorsque les réacteurs existants sont des REO

Type	Secteur commercial	Strate intermédiaire	Strate finale
1	REO-UOX		RNR (incinérateur ou surgénérateur)
2	REO-UOX	REO MOX-Pu	RNR (incinérateur ou surgénérateur)
3	REO-UOX		REO MOX- incinérateur de TRU
4	REO-UOX	VHTR-CMI-Pu/AM	RNR (incinérateur)
5	REO → RTHT (UOX)		RNR (incinérateur ou surgénérateur)
6	REO → RTHT (UOX)	VHTR-CMI-Pu/AM	RNR (incinérateur)
7	REO-UOX	PHWR MOX-Pu	RNR (incinérateur)
8	REO-UOX	REO UOX RNR auto-suffisant	REO avancés {UOX/M(OX/U ²³³ -U ²³⁸)OX} + RNR (surgénérateur)

CMI = combustible à matrice inerte.

Des scénarios de transition similaires pourraient être envisagés en partant d'un parc de réacteurs à eau lourde commerciaux, par exemple les réacteurs CANDU canadiens, ou d'un parc de réacteurs à caloporteur gaz tels ceux exploités au Royaume-Uni. La transmutation dans les REO envisagée pendant la période intermédiaire serait possible non seulement avec des combustibles MOX mais avec des combustibles à matrice inerte, des cibles d'actinides mineurs et des combustibles à base de thorium.

5.4.3 Flexibilité de la transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides

Aux États-Unis, la priorité a été initialement donnée au déploiement de réacteurs rapides capables d'incinérer les éléments transuraniens. À cet effet, des concepts de réacteurs rapides à facteur de conversion inférieur à 1 sont étudiés. Selon la demande d'électricité future et la demande éventuelle d'autres applications nucléaires, et à mesure que les ressources en uranium se raréfieront, ces réacteurs pourraient être modifiés pour fonctionner à des facteurs de conversion plus élevés, voire supérieurs à 1 (mode surgénérateur).

Certains pays membres comme le Japon étudient également des concepts de réacteurs à facteur de conversion plus élevés parce qu'ils manquent d'éléments transuraniens pour fabriquer le combustible des réacteurs rapides que prévoit leur plan de déploiement. Ces surgénérateurs leur permettront d'accomplir avec succès la transition à des réacteurs rapides et des cycles avancés dans un intervalle de temps relativement plus court.

Dans d'autres pays tels que la France, on peut envisager de recourir à des réacteurs isogénérateurs pour une transition axée sur le renouvellement du parc de REO de façon à stabiliser puis réduire au minimum tous les flux massiques et stocks d'actinides.

5.5 Problèmes généraux

Les facteurs susceptibles d'influer sur le calendrier de transition incluent les spécifications des réacteurs rapides avancés et le temps nécessaire au déploiement des technologies avancées du cycle du combustible (réacteurs, usines de séparation et usines de fabrication de combustible). Des réacteurs rapides prototypes et de démonstration ont été construits et exploités avec plus ou moins de succès

dans plusieurs pays, par exemple les réacteurs EBR-II et FFTF aux États-Unis, Phénix en France et le BN-600 en Russie. Si l'on construisait les futurs RNR en utilisant ces technologies la fin de la période de transition pourrait être définie avec précision.

Cependant, selon leurs besoins et objectifs spécifiques, certains pays pourraient avoir à développer des réacteurs rapides avancés respectant des spécifications plus strictes, par exemple la capacité d'incinérer des transuraniens, ou un coût de la centrale moins élevé. Les évaluations montrent que ces conditions déboucheraient sur des concepts de centrales différents, y compris des formes avancées de combustibles, de matériaux de structure, d'îlots conventionnels ou des philosophies de la sûreté innovantes. Il faudra dans ce cas approfondir les études et recherches. Ainsi, le délai minimal requis pour amorcer la transition dépendrait des efforts de développement exigés pour les nouveaux réacteurs rapides, à moins que l'on exploite dans un premier temps les technologies existantes. Il en va de même des procédés de séparation et de fabrication. C'est pourquoi certains pays membres envisagent de s'engager sur la voie de la transmutation en commençant par le recyclage de combustible MOX dans des REO.

Les points suivants font la synthèse des caractéristiques et problèmes généraux identifiés au cours des études des scénarios de transition :

- Avec l'augmentation de la production électronucléaire, la poursuite des pratiques actuelles fondées sur un cycle du combustible ouvert pourrait avoir pour conséquences l'augmentation substantielle du nombre de sites de dépôts géologiques (en fonction de la capacité des sites), l'accumulation de plutonium de qualité réacteur dans le combustible usé et la valorisation insuffisante des ressources en uranium.
- La transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides est avant tout motivée par la volonté d'améliorer la gestion des ressources naturelles, de renforcer la sécurité d'approvisionnement en énergie et de réduire le volume et la radiotoxicité des déchets. Elle nécessite de développer des installations du cycle du combustible avancées qui n'ont pas encore été pleinement déployées dans les pays de l'OCDE, et notamment des usines de retraitement et de fabrication et les technologies associées. La transition exige le retraitement d'une grande quantité de combustible usé mais, en contrepartie, elle permettra de réduire les stocks de déchets finals et leur activité.
- Bon nombre de pays de l'OCDE envisagent de passer des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides à l'échelle nationale ou régionale. Il est probable que des programmes de transition soient mis en place dans un grand nombre de pays mais pas dans tous. La transition est réalisable dans la zone OCDE, mais ne devrait s'achever qu'à la fin de ce siècle ou au début du siècle suivant. Étant donné leur durée de vie prévue de plus de 50 ans, les réacteurs thermiques continueront de jouer un rôle majeur, dans un premier temps (jusqu'en 2040/2050) lorsqu'ils serviront à renouveler le parc existant, puis lorsqu'on recourra à des REO ou des réacteurs à eau lourde pour augmenter la puissance installée.
- Le déploiement de réacteurs rapides surgénérateurs sera difficile dans les pays qui exploitent actuellement un petit nombre de réacteurs et qui possèdent des réserves de plutonium limitées.
- Au lieu de considérer la transition à l'échelle d'un pays, on peut envisager de la mettre en œuvre à l'échelle régionale ou mondiale, ce qui autorise plus de souplesse dans un délai donné. Un tel projet nécessite cependant que les pays adhèrent à la législation et aux réglementations internationales sur la sûreté et la sécurité des transferts de volumes importants de matières nucléaires.

- Quelques pays ont étudié la possibilité de déployer des réacteurs rapides surgénérateurs pour produire des matières fissiles destinées à être brûlées dans des réacteurs thermiques avancés. À l'état d'équilibre, il n'y aurait pas besoin de services d'enrichissement, que ce soit pour les réacteurs rapides ou thermiques. Par exemple, il serait possible d'utiliser des combustibles à base de thorium dans des réacteurs rapides pour produire de ^{233}U fissile destiné aux réacteurs thermiques.
- En général, les hypothèses et paramètres suivants sont les plus importants pour les études et analyses des scénarios de transition et de leurs avantages : taux de croissance de la puissance nucléaire ; calendrier de déploiement et capacité des installations de séparation (en particulier pour le combustible usé des REO) ; temps écoulé entre le déchargement du combustible usé des REO et son recyclage (temps de séjour hors pile) ; inventaire initial de matières fissiles utilisables en RNR ; facteur de conversion des RNR (dépendant du concept) ; déchets ultimes produits (masse, activité et radiotoxicité) ; consommation mondiale d'uranium naturel ; et critères de non-prolifération.

Références

ACNRE/METI (2005), *Long-Term Outlook for Energy Supply and Demand*, mars, pp. 97-100, (en japonais).

Delpech, M., F. Storrer, B. Boullis et F. Carré (2007), « French long term options for fuel cycles and reactors », présenté au Groupe de travail technique sur les options pour le cycle du combustible nucléaire et la gestion du combustible usé, 9-11 octobre 2007, Vienne, Autriche.

Maeda, H. (2005), « Nuclear Energy in Japan – Current Status and Future », Actes de Conférence internationale sur le thème 'Cinquantième de l'électronucléaire : bilan et perspectives pour les 50 prochaines années' tenue en Russie, AIEA, discours d'ouverture.

Monti, S. (2008), note pour le Groupe d'experts, *communication privée*.

AEN et AIEA, (2008), *Uranium 2007 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris, France.

Roelofs, F. *et al.*, (2008), « Market Share Scenarios for Gen-III and Gen-IV Reactors in Europe », actes de l'ICAPP (International Congress on Advances in Nuclear Power Plants) 08, 8-12 juin 2008, Anaheim, CA, États-Unis.

Salvatores, M., L. Boucher (2008), Fuel Cycle Scenarios Selection for a Regional Approach at European Scale, in contract FI6W-036418- *PATEROS : Partitioning and Transmutation Roadmap for Advanced Fuel Cycle Leading to a Sustainable Nuclear Energy*.

Vocka, R. (2008), *Transition Scenario to Fast Reactor Fuel Cycle: Case of Small Country*, note pour le Groupe d'experts, *communication privée*.

Yacout, A.M., R.N. Hill et S.J. Piet (2005), « System Dynamics Studies of Advanced Fuel Cycle Scenarios », Actes de GLOBAL 2005, 9-13 oct 2005, Tsukuba, Japon.

Chapitre 6

RÉSULTATS, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'énergie nucléaire, qui produit une proportion notable (environ 15 %) de l'électricité actuellement consommée dans le monde, est appelée à rester une source d'énergie importante pendant plusieurs décennies, que les pays décident individuellement d'interrompre ou d'intensifier leur programme nucléaire. Le parc de réacteurs aujourd'hui en service est fiable et globalement très performant, sûr et économique. La plupart des centrales construites dans les années 80 et 90 devraient pouvoir être exploitées pendant plus de 50 ans. Parallèlement, de nouveaux réacteurs et cycles du combustible avancés – réacteurs à neutrons rapides et cycles fermés, le plus souvent – sont mis au point afin d'améliorer la sûreté, la compétitivité économique, la durabilité, la résistance à la prolifération et la protection physique des futurs systèmes nucléaires.

Dans ce contexte, la mise en œuvre de programmes de transition des réacteurs thermiques aux réacteurs rapides devrait être l'un des axes majeurs du développement de l'énergie nucléaire jusqu'à la fin du siècle, voire au-delà. Cette transition, qui vise à atténuer les tensions sur les ressources naturelles et l'impact des déchets radioactifs, soulève des problèmes spécifiques qui doivent être pris en compte au moment opportun si l'on veut que le scénario, sélectionné en fonction de nombreux facteurs tels que les objectifs stratégiques nationaux, les capacités industrielles et le niveau de développement technologique, soit le mieux adapté. L'analyse des opportunités et des difficultés de la période de transition est un préalable à tout processus de décision rationnel dans ce domaine.

Les réacteurs rapides peuvent être utilisés comme surgénérateurs ou comme incinérateurs. Dans le premier cas, ils peuvent multiplier par au moins 50 la quantité d'énergie extraite de l'uranium naturel, ce qui permet de prolonger de plusieurs siècles la durée de vie des ressources en uranium actuellement identifiées. Dans le second cas, ils éliminent progressivement les actinides les plus indésirables, en premier lieu le plutonium, ce qui raccourcit la période pendant laquelle les déchets radioactifs doivent être surveillés et réduit le nombre et la taille des dépôts nécessaires pour le stockage de déchets de haute activité.

Si les réacteurs rapides constituent une solution avantageuse au niveau mondial pour renforcer la sécurité d'approvisionnement en combustible nucléaire et diminuer le volume et la radiotoxicité des déchets, leur intérêt et leur viabilité au niveau d'un pays donné dépendent très largement du contexte national et régional. En particulier, la taille et le rythme de croissance futur du parc électronucléaire national ont une incidence très forte sur les avantages éventuels du déploiement de réacteurs rapides. La politique nationale de gestion des déchets radioactifs est également un facteur déterminant puisque les RNR sont un moyen de simplifier la gestion et le stockage des déchets.

Dans les pays qui exploitent peu de réacteurs et prévoient une croissance modeste de leur production électronucléaire, il pourrait ne pas être rentable de construire des infrastructures indispensables à la transition, quoique cette construction puisse être envisagée dans une perspective de développement durable. Ainsi, ces pays pourraient conclure des accords multilatéraux et participer à des coopérations internationales pour assurer la viabilité du retraitement et du recyclage du combustible utilisé dans des réacteurs rapides domestiques.

Les pays dont la politique de stockage direct du combustible usé est bien définie, avec notamment un programme visant l'ouverture d'un dépôt d'ici quelques années, pourraient avoir peu intérêt à s'engager sur la voie de la transition. En revanche, pour les pays où la question du stockage du combustible usé et/ou des déchets de haute activité actuels et futurs est encore ouverte, le déploiement de réacteurs rapides offre une option intéressante pour la gestion et le stockage des déchets.

Bien que quelques réacteurs rapides et les installations du cycle associées aient été construits et exploités dans plusieurs pays, les systèmes nucléaires à réacteurs rapides n'ont pas encore atteint le niveau de développement et de maturité technique des systèmes à réacteurs thermiques. C'est pourquoi, des efforts de recherche et développement seront nécessaires pour concevoir et développer des systèmes exploitables à l'échelle industrielle.

Les problèmes que pose le développement de systèmes à réacteurs rapides ne diffèrent pas de ceux que l'on rencontre en général avec les technologies nucléaires. L'objectif est de concevoir, de construire et d'exploiter de façon fiable, sûre et rentable des réacteurs et des installations, parmi lesquelles des usines de fabrication et de retraitement de combustible, capables d'assurer les services de gestion de matières fissiles escomptés.

Compte tenu de la diversité des problèmes scientifiques et techniques à résoudre dans le cadre des programmes de R-D, des initiatives internationales pourraient être nécessaires pour favoriser les projets de collaboration, réduire la charge financière de chaque pays participant et créer des synergies au sein d'équipes multinationales.

La principale caractéristique des programmes électronucléaires est la longueur des délais de mise en place et la transition des systèmes thermiques aux systèmes rapides ne fait pas exception à la règle. Il faudra plusieurs décennies pour remplacer par des réacteurs rapides tous les réacteurs thermiques exploités aujourd'hui. En outre, les objectifs finals de la transition, à savoir la construction et l'exploitation d'un parc autosuffisant de réacteurs surgénérateurs et/ou le recyclage intégral de tous les actinides, ne seront pas atteints avant un siècle environ.

Dans cette situation, la mise en œuvre des programmes de transition ne pourra réussir sans une planification à longue échéance et une politique énergétique globale stable. La stabilité de la politique énergétique des pouvoirs publics est impérative si l'on veut que le rôle de l'énergie nucléaire soit défini dans une perspective de long terme et que les objectifs restent les mêmes pendant plusieurs décennies.

Il existe un large éventail de concepts techniques de réacteurs rapides, de combustibles et de cycles du combustible. Afin d'exploiter le spectre neutronique rapide de manière optimale, il importe d'étudier les possibilités des systèmes considérés en fonction des objectifs des stratégies fixées. La sélection des technologies les mieux adaptées doit reposer sur une analyse approfondie des paramètres scientifiques et techniques visant à déterminer quelles technologies sont le plus aptes à atteindre les objectifs définis.

Les choix technologiques concernent non seulement l'étape finale, c'est-à-dire l'exploitation de réacteurs rapides à l'équilibre avec ou sans réacteurs thermiques standard, mais aussi la transition elle-même et les proportions respectives de réacteurs thermiques et rapides dans le parc électronucléaire au fil des décennies. Les paramètres les plus importants à prendre en compte pendant la période de transition, outre la disponibilité constante d'une quantité suffisante de matières fissiles pour chaque type de réacteur en service, sont les caractéristiques économiques des différentes installations du cycle du combustible et les facteurs sociopolitiques tels que l'adhésion du public et la résistance à la prolifération.

Pour le public, la mise en œuvre de technologies avancées est souvent source d'inquiétudes auxquelles il convient de répondre en temps opportun par la concertation et le dialogue entre les décideurs, les acteurs de l'industrie et la société civile. Compte tenu des délais en jeu, ce type d'échanges est particulièrement important lorsque l'on entreprend de mettre en œuvre des scénarios de transition.

Même dans les pays où le secteur et les infrastructures nucléaires sont bien développés, la transition aux systèmes à neutrons rapides nécessitera d'importants efforts d'adaptation et la mise en service de nouvelles installations. Les infrastructures à rénover et à modifier le cas échéant englobent notamment les cadres législatifs et réglementaires, les laboratoires et autres équipements de recherche, et la formation des ressources humaines.

Les programmes d'enseignement et de formation sont bien sûr importants pour le secteur nucléaire dans son ensemble, mais le personnel affecté au développement de systèmes avancés à neutrons rapides doit posséder des compétences et des qualifications spécifiques acquises dans le cadre de programmes spécialisés d'universités ou d'établissements d'enseignement supérieur. Une bonne gestion des ressources humaines sera un facteur déterminant pour le succès des stratégies de relance du secteur nucléaire et de transition des systèmes à neutrons thermiques aux systèmes à neutrons rapides.

L'expérience industrielle de certains pays dans le domaine des réacteurs rapides et du retraitement/recyclage des matières fissiles pourrait être exploitée dans les futurs travaux de recherche et projets de collaboration internationale. À cet égard, il est impératif de ne pas négliger la gestion des connaissances de façon à éviter de perdre les compétences de la main d'œuvre plus âgée et à conserver les résultats et conclusions des travaux antérieurs.

La question de la résistance à la prolifération est fondamentale pour tous les systèmes nucléaires. Elle doit être étudiée avec attention, en tenant compte des mesures intrinsèques et extrinsèques, si l'on veut pouvoir sélectionner les options optimales pour la période de transition et au-delà. L'efficacité du système international des garanties pourrait être renforcée grâce à la mise en place de stratégies innovantes de fourniture de services du cycle du combustible, reposant sur des installations multinationales. Au niveau national, l'implantation sur un même site de réacteurs et d'installations du cycle du combustible compte parmi les mesures susceptibles d'améliorer la résistance à la prolifération et la protection physique.

Enfin, la coopération internationale est un outil très efficace pour partager les connaissances, le savoir-faire et les infrastructures, réduire au minimum les coûts de R-D payés par chaque pays et améliorer l'efficacité globale des travaux de mise au point. À l'étape du déploiement industriel, les initiatives multinationales pourraient se révéler indispensables à la viabilité économique des scénarios de transition.

Annexe 1

LISTE DES PARTICIPANTS

BELGIQUE

Édouard Mbala MALAMBU

SCK•CEN

Luc VAN DEN DURPEL

LISTO bvba

CANADA

Gary R. DYCK

EACL

David TREGUNNO

EACL

CORÉE

Dohee HAHN

KAERI

Young-in KIM

KAERI

ÉTATS-UNIS

Temitope TAIWO

ANL

FRANCE

Marc DELPECH (Coprésident)

CEA

Christine LOAEC

CEA

ITALIE

Stefano MONTI

ENEA

JAPON

Kiyoshi ONO (Coprésident)

JAEA

PAYS-BAS

Aliki I. van HEEK

NRG

RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

Radim VOCKA

Ustav jaderného výzkumu, UJV

RUSSIE (FÉDÉRATION DE)

Elena POPLAVSKAYA

IPPE

SUÈDE

Pål EFSING

Ringhals, Vattenfall

COMMISSION EUROPÉENNE

Giustino MANNA

Institut de l'énergie, Centre commun de recherche

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Vladimir USANOV

Division de l'énergie d'origine nucléaire

AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Evelyne BERTEL (Secrétaire)

Division du développement de l'énergie nucléaire

Hélène DÉRY (Assistante)

Division du développement de l'énergie nucléaire

Annexe 2

GLOSSAIRE

AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AM	Actinides mineurs
CSN	Comité des sciences nucléaires (AEN)
DHA	Déchets de haute activité
GAINS	<i>Global Architecture of Innovative Nuclear Energy Systems Based on Thermal and Fast Reactors Including a Closed Fuel Cycle</i> [Architecture globale de systèmes d'énergie nucléaire innovants faisant appel à des réacteurs à neutrons thermiques et rapides comportant des cycles du combustible fermés]
GFR	<i>Gas Fast Reactor</i> [Réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz]
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIF	<i>Generation IV International Forum</i> [Forum international Génération IV]
GNEP	<i>Global Nuclear Energy Partnership</i> [Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire]
INPRO	<i>International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles</i> [Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible innovants]
INS	<i>Innovative Nuclear Systems</i> [Systèmes d'énergie nucléaire innovants]
LFR	<i>Lead Fast Reactor</i> [Réacteur rapide à caloporteur plomb]
MDEP	<i>Multinational Design Evaluation Programme</i> [Programme multinational d'évaluation des conceptions]
MOX	Combustible à mélange d'oxydes
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i> [Réacteur à sels fondus]
NDC	Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (AEN)
PBMR	<i>Pebble Bed Modular Reactor</i> [Réacteur modulaire à lit de boulets]

PHWR	<i>Pressurised Heavy Water Reactor</i> [Réacteur à eau lourde sous pression]
R-D	Recherche et développement
RD-D	Recherche, développement et déploiement
REB	Réacteur à eau bouillante
REO	Réacteur à eau ordinaire
REP	Réacteur à eau sous pression
RNR	Réacteur à neutrons rapides
SCWR	<i>Super Critical Water Reactor</i> [Réacteur à eau supercritique]
SFR	<i>Sodium Fast Reactor</i> [Réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium]
UTS	Unité de travail de séparation
TRU	Éléments transuraniens
USNRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i> [Autorité de sûreté nucléaire américaine]
UE	Union européenne
VHTR	<i>Very High Temperature Reactor</i> [Réacteur à très haute température]

OECD PUBLISHING, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
PRINTED IN FRANCE
(66 2009 05 2 P) ISBN 978-92-64-06066-1 – No. 56710 2009



Questions stratégiques et politiques liées à la transition des systèmes nucléaires thermiques aux systèmes rapides

Le renouveau d'intérêt pour l'énergie nucléaire résultant des préoccupations causées par le changement climatique global et la sécurité d'approvisionnement, qui est susceptible d'entraîner une croissance notable de la production d'électricité nucléaire, rend plus attractifs les réacteurs à neutrons rapides fonctionnant en cycle fermé. La transition entre le parc actuel de réacteurs à neutrons thermiques et des systèmes à neutrons rapides demandera plusieurs décennies et d'importants efforts de RD-D. Cet ouvrage identifie et analyse les questions stratégiques et politiques clés posées par une telle transition et vise à assister les décideurs dans le choix des meilleures approches pour mettre en œuvre des scénarios de transition.

Les sujets traités dans ce livre intéresseront les décideurs des gouvernements et de l'industrie nucléaire ainsi que les spécialistes de l'analyse des systèmes énergétiques nucléaires et des cycles du combustible avancés.

