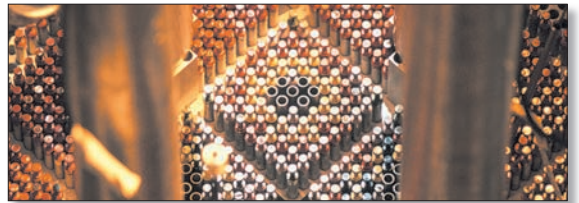


Innovation dans la technologie nucléaire



Développement de l'énergie nucléaire

L'innovation dans le domaine de l'énergie nucléaire

© OCDE 2007
AEN n° 6104

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

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

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

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE.

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

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

L'AGENCE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OECE. Elle a pris sa dénomination actuelle le 20 avril 1972, lorsque le Japon est devenu son premier pays membre de plein exercice non européen. L'Agence compte actuellement 28 pays membres de l'OCDE : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission des Communautés européennes participe également à ses travaux.

La mission de l'AEN est :

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

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

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

© OCDE 2007

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

Crédits couverture : KHNP – Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd. et P. Stroppa, CEA (photos).

AVANT-PROPOS

L'innovation a caractérisé la réussite du développement de l'énergie nucléaire dans le passé et demeure essentielle aujourd'hui pour son avenir durable. Récemment, plusieurs pays membres de l'AEN ont lancé des efforts nationaux et internationaux pour définir des objectifs et des feuilles de routes afin de développer des technologies nucléaires innovantes. Le Forum international Génération IV (GIF) et le Projet international sur les réacteurs et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) sont des exemples de telles entreprises.

L'innovation a besoin d'éléments déclencheurs et d'incitations. Comment susciter l'innovation nucléaire est une question clé pour l'industrie et les gouvernements concernés. En particulier, si les technologies visées sont très différentes de celles qui existent actuellement, leur développement doit être géré efficacement avec tous les moyens de promotion de l'innovation disponibles dans le cadre des pratiques usuelles de recherche, développement, démonstration et déploiement industriel (RDD-D) dans le domaine nucléaire.

De nombreuses études ont été faites sur les processus d'innovation dans différents secteurs technologiques et sur les systèmes nationaux d'innovation, en particulier dans le contexte de l'OCDE. Néanmoins, aucune étude de cette nature consacrée à la technologie nucléaire n'avait été réalisée jusqu'à ce jour. C'est pourquoi le Comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) a décidé d'inclure une telle étude dans son programme de travail pour 2005-2006. Cet ouvrage est le résultat de l'étude en question.

Basée sur les rapports des pays participants et les études de cas qu'ils ont fournies, qui sont reproduits dans leur intégralité sur le site Internet de l'AEN, l'étude vise à passer en revue les caractéristiques spécifiques des systèmes d'innovation dans le domaine nucléaire, à en analyser les performances et le retour d'expérience, et à dégager des recommandations pour en améliorer l'efficacité.

L'étude a été réalisée par un Groupe d'experts (voir annexe A) composé de représentants de compagnies d'électricité exploitant des centrales nucléaires, de compagnies fournissant ces centrales et d'organismes de recherche. Elle ne reflète pas nécessairement les points de vue des gouvernements ou des organisations internationales qui ont nommé ces experts. Le rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

Remerciements

Le Groupe d'experts remercie M. Jerry Sheehan (DSTI, OCDE) qui a fourni des lignes directrices et des informations sur les études de cas relatives aux systèmes d'innovation dans différents secteurs effectuées préalablement sous l'égide du Comité de politique scientifique et technologique et de son Groupe de travail sur la politique d'innovation technologique, qui ont servi de point de départ à la présente étude.

Le Groupe souhaite dédier ce livre à M. Paul Govaerts, qui en fut membre et dont l'expérience aurait été précieuse pour la poursuite de l'étude, mais qui nous a malheureusement quitté avant son achèvement.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	3
RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE.....	9
1. INTRODUCTION.....	17
1.1 Contexte	17
1.2 Objectifs.....	19
1.3 Champ	20
1.4 Approche.....	20
2. MÉTHODOLOGIE	23
2.1 Acception courante des concepts d' <i>innovation</i> et de <i>systèmes d'innovation</i>	23
2.2 Synthèse des rapports nationaux.....	28
2.3 Analyse des études de cas	29
3. BESOINS D'INNOVATION DANS LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE.....	35
3.1 Perspectives énergétiques à l'échelon mondial.....	35
3.2 Contraintes de durabilité.....	39
3.3 Rôle de l'innovation en matière de technologie nucléaire	43
4. EFFORTS D'INNOVATION NUCLÉAIRE À L'ÉCHELON NATIONAL ET INTERNATIONAL.....	47
4.1 Programmes de soutien aux centrales nucléaires et installations du cycle du combustible existantes.....	48
4.2 Programmes de soutien aux centrales et cycles du combustible de moyen terme	51
4.3 Programmes de soutien aux centrales et cycles du combustible de long terme.....	53
4.4 Programmes hors production d'électricité	60
5. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE.....	63
5.1 Caractéristiques spécifiques du secteur de l'énergie nucléaire	63
5.2 Schémas de développement nucléaire.....	65
5.3 Caractéristiques des systèmes d'innovation nucléaire	69
5.4 Principaux facteurs de performance de l'innovation nucléaire.....	95
6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	107
RÉFÉRENCES	117

Annexes

A. LISTE DES MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS.....	119
B. ABRÉVIATIONS.....	121
C. CONTENU DES RAPPORTS AU NIVEAU NATIONAL ET INSTRUCTIONS	127

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Description des cas	33
Tableau 3.1 Liste des principaux indicateurs environnementaux pour l'OCDE	40
Tableau 3.2 Indicateurs du développement durable (liste indicative applicable à l'énergie nucléaire)	40
Tableau 4.1 Domaines techniques stratégiques de l'EPRi aux États-Unis.....	48
Tableau 4.2 Situation actuelle des réacteurs de génération III/III+	52
Tableau 4.3 Concepts de réacteurs de génération IV au sein du GIF	54
Tableau 5.1 Agences gouvernementales ayant un rôle dans le domaine de l'énergie nucléaire.....	72
Tableau 5.2 Principaux exécutants de la R-D nucléaire dans les pays participants.....	73
Tableau 5.3 Principaux fournisseurs du secteur nucléaire dans les pays participants	76
Tableau 5.4 Principales compagnies d'électricité nucléaire dans les pays participants	77
Tableau 5.5 Récapitulatif des études de cas.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Chaîne logistique simplifiée dans le secteur de l'énergie nucléaire	20
Figure 1.2 Approche utilisée dans l'étude.....	21
Figure 2.1 Représentation simplifiée des différents stades de l'innovation.....	26
Figure 2.2 Composants et liens d'un système d'innovation.....	28
Figure 2.3 Éléments déterminant les résultats en matière d'innovation.....	29
Figure 3.1 Demande énergétique mondiale suivant les principaux combustibles.....	35
Figure 3.2 Augmentation de la puissance nucléaire installée par région, 2003-2030	37
Figure 3.3 Capacité de production d'énergie électrique estimée et part de l'énergie nucléaire...	38
Figure 3.4 Accidents graves du secteur de production d'électricité, pays de l'OCDE et hors OCDE, 1969-96	42
Figure 4.1 Exemple de projections à moyen et long terme de déploiements de centrales nucléaires au Japon	47
Figure 4.2 Structure de gestion du GIF	55
Figure 4.3 Concept d'études de faisabilité d'un système commercial RNR-cycle au Japon	57
Figure 4.4 Concept de production nucléaire d'hydrogène au Japon	61

Figure 5.1	Évolutions du nombre de brevets relatifs à la technologie des réacteurs nucléaires des pays bénéficiaires de brevets auprès de l'Office des brevets et des marques des États-Unis (USPTO)	67
------------	---	----

LISTE DES ENCADRÉS

Encadré 1.1	Évolution des réacteurs nucléaires	18
Encadré 2.1	Définitions de l' <i>innovation</i> dans d'autres études.....	24
Encadré 4.1	Programme Génération IV de la Finlande (GEN4FIN).....	56
Encadré 5.1	Analyse des brevets relatifs à la technologie des réacteurs nucléaires aux États-Unis	68
Encadré 5.2	Pouvoirs publics et agences gouvernementales de l'énergie nucléaire et leurs rôles au Japon	71
Encadré 5.3	Centres de référence en Espagne	74
Encadré 5.4	Politique nationale d'innovation lancée en 2004 en République tchèque.....	79
Encadré 5.5	« Actions d'amorçage » à l'Institut Paul Scherrer en Suisse	81
Encadré 5.6	Mesures incitatives en faveur des développements technologiques en Belgique	82
Encadré 5.7	Plan stratégique conjoint de R-D du DOE et de l'industrie électronucléaire sur les REO.....	83
Encadré 5.8	Projets intégrés au sein de l'Union européenne	84
Encadré 5.9	Grappes de savoir et centres de connaissances au sein de VTT en Finlande.....	84
Encadré 5.10	Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (ENEN)	88
Encadré 5.11	Exercice NuTRM (<i>Nuclear Technical Roadmap</i>) en République de Corée.....	93

RÉSUMÉ DE SYNTHÈSE

Méthodologie

Dans la présente étude, l'*innovation* est définie à travers la description des produits (ou procédés) nouveaux ou sensiblement améliorés qu'elle génère et dont l'introduction sur le marché (ou l'utilisation au sein d'une entreprise) apporte des avantages économiques et/ou sociaux. L'*innovation* englobe toute une série d'activités – recherche fondamentale, développement, démonstration, déploiement initial et diffusion généralisée – qui résultent en un produit nouveau ou sensiblement amélioré, jusqu'à son introduction sur le marché, et demandent donc plus d'efforts que la simple R-D.

L'étude a pour objet les *systèmes d'innovation* requis pour réaliser des innovations dans les *systèmes d'énergie nucléaire*. Ces systèmes englobent les acteurs de l'innovation (pouvoirs publics, exécutants de la R-D, fournisseurs de systèmes/services, fournisseurs d'énergie) et leurs relations, ainsi que les structures institutionnelles, l'infrastructure d'innovation, les pratiques de gestion, le cadre juridique régissant l'énergie nucléaire, etc.

L'étude s'appuie sur les données et informations relatives aux systèmes d'innovation nucléaire des pays membres. Elles émanent essentiellement de onze rapports au niveau national et de vingt-trois études de cas préparés par les membres d'un groupe d'experts ad hoc. Les études de cas ont été analysées selon dix éléments censés déterminer les performances et les exigences en matière d'innovation : les ressources humaines ; les ressources financières ; les intrants physiques ; l'accès à la science, aux technologies et aux meilleures pratiques commerciales et industrielles ; la capacité et la propension des entreprises à innover ; les institutions et l'infrastructure ; les réseaux, les collaborations et les groupes ; l'efficacité des mécanismes du marché ; et enfin, l'environnement de l'entreprise.

Les besoins en matière d'innovation nucléaire

Au regard des perspectives énergétiques mondiales et des contraintes (économiques, environnementales et sociales) de développement durable, l'énergie nucléaire constitue une option susceptible de répondre de manière « durable » aux besoins énergétiques croissants à l'échelon mondial dans le futur. En l'état actuel, la technologie nucléaire démontre un respect très poussé des critères de durabilité et affiche d'excellents résultats par rapport aux autres options énergétiques. Toutefois, il reste pour le public certaines questions préoccupantes liées au déploiement de l'énergie nucléaire à grande échelle, des questions que l'on peut pour beaucoup résoudre par des approches innovantes. Ce dernier point montre combien il est important d'innover dans le domaine nucléaire.

Le potentiel d'innovation de la technologie nucléaire concernant les centrales existantes est considérable, notamment au niveau du maintien et du renforcement de la sûreté des installations, des augmentations de puissance et de l'obtention de plus grands rendements (ce qui implique de plus grandes sollicitations des matériaux et des composants) et enfin de l'optimisation des coûts, à la fois au niveau de l'exploitation et du cycle du combustible. Ce potentiel est en outre particulièrement

important au vu des enjeux futurs liés à la fermeture du cycle du combustible nucléaire et à la pénétration du marché de la chaleur par les systèmes nucléaires de quatrième génération.

Dans la perspective d'un déploiement plus important de l'énergie nucléaire à l'avenir, des solutions innovantes sont à l'étude dans des domaines tels que la préservation des ressources et la minimisation des déchets, l'élimination effective des catastrophes à l'extérieur des centrales, le maintien de la compétitivité économique, la réduction des risques financiers, la pénétration de nouveaux secteurs énergétiques et l'élimination de l'emploi des matières nucléaires à des fins non civiles. La R-D et l'application de solutions innovantes constituent par ailleurs un excellent moyen d'attirer de jeunes scientifiques et ingénieurs pleins de talent, et de les retenir dans la branche nucléaire.

Programmes d'innovation nucléaire

Répondant aux besoins concernant les centrales nucléaires et les installations du cycle du combustible existants, nombre de projets actuels comportent des éléments innovants sur de nombreux thèmes, tels que la dégradation/le vieillissement des matériaux, le combustible hautes performances et sa fiabilité, l'évaluation non destructive et la caractérisation des matériaux, la fiabilité de l'équipement et les performances humaines, la modernisation du matériel et des systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande, la gestion des risques liés aux installations nucléaires, les technologies et applications de gestion des risques de sûreté, etc. Les programmes de cette catégorie sont en général conduits par des instituts de recherche industrielle (IRI), essentiellement à la demande des compagnies d'électricité et des autorités de sûreté.

Les programmes types de R-D axés sur le déploiement à moyen terme (5-10 ans) concernent le perfectionnement des réacteurs des générations III et III+ par des fonctions améliorées : sûreté renforcée (par le biais de caractéristiques intrinsèques et de systèmes passifs), conception normalisée, plus simple et plus robuste, plus grande disponibilité et plus longue durée de vie utile planifiées dès la conception, probabilité toujours plus réduite d'accidents de fusion du cœur et incidences minimales sur l'environnement en cas d'accidents graves. Plus d'une douzaine de réacteurs de génération III et III+ sont à divers stades de développement ; c'est le cas notamment des réacteurs évolutifs à eau sous pression (REP), à eau bouillante (REB) et à eau lourde sous pression (RELP). Ces développements ont généralement été réalisés par les fournisseurs de systèmes et/ou les compagnies d'électricité avec, dans quelques pays, une certaine part de coordination des pouvoirs publics.

Les programmes axés sur le déploiement à long terme portent essentiellement sur les systèmes nucléaires de génération IV. Ainsi, le Forum international Génération IV (GIF), formé en janvier 2000 et composé de onze membres, a sélectionné six systèmes prometteurs pour répondre aux futurs défis énergétiques : les réacteurs rapides refroidis au sodium (SFR), les réacteurs rapides refroidis au gaz (GFR), les réacteurs rapides refroidis au plomb (LFR), les réacteurs à sels fondus (MSR), les réacteurs refroidis à l'eau supercritique (SCWR) et les réacteurs à très haute température (VHTR). Afin de mettre en œuvre la R-D nécessaire pour chaque système, le GIF a constitué des comités de direction de systèmes (*System Steering Committees*), qui planifient et assurent la cohérence des projets de R-D participant à la conception de chacun de ces systèmes. Actuellement, des plans de R-D détaillés destinés à combler les retards dans les différentes technologies retenues sont en cours d'élaboration et d'examen.

Techniquement parlant, les réacteurs nucléaires produisent de l'énergie sous forme de chaleur et peuvent par conséquent livrer des produits énergétiques autres que l'électricité, notamment du chauffage urbain et de la chaleur industrielle, en particulier pour la production d'eau potable et, à

terme, de l'hydrogène. La fourniture de chaleur à haute température jouant un rôle déterminant dans la production d'hydrogène nucléaire à haut rendement, les réacteurs à haute température, dont le VHTR, font l'objet d'un intérêt croissant. Nombre de pays poursuivant des programmes nucléo-énergétiques avancés, tels les États-Unis, la France, le Japon, la République de Corée et les pays de la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM) ont lancé des programmes de production d'hydrogène nucléaire.

Spécificités du secteur nucléaire

La technologie électronucléaire présente des caractéristiques spécifiques qui influent sur la manière dont l'innovation est conduite dans ce secteur. On peut les regrouper sous quatre grands domaines : technologie et connaissances requises pour l'utilisation de l'énergie nucléaire, marché de l'industrie nucléaire, environnement financier et économique, et enfin, environnement juridique et sociopolitique.

Le développement de la technologie électronucléaire exige de longs délais de mise en oeuvre et suppose des installations de test, d'expérimentation et de fabrication importantes, complexes et intégrant plusieurs systèmes, ainsi que des centrales de production d'électricité répondant à des exigences de qualité très particulières (qualité nucléaire). La recherche liée à l'énergie nucléaire couvre toute une série de disciplines, qui demandent en règle générale des efforts de R-D importants et de longue haleine, absorbant de vastes ressources et incluant, dans l'idéal, la participation de plusieurs pays. Cette même recherche doit par ailleurs également prendre en compte dans sa mise en place les questions de non-prolifération et de radioprotection.

Sur le marché de l'industrie électronucléaire, les transactions sont relativement peu nombreuses mais représentent des montants importants et ce sont les fournisseurs, les compagnies d'électricité et les pouvoirs publics qui prennent l'initiative de la recherche. Ce marché est par ailleurs soumis aux dispositions d'accords internationaux, notamment en ce qui concerne la non-prolifération et les contrôles à l'exportation.

La mise en place de la technologie nucléaire se caractérise par un investissement de départ élevé et des retours sur investissement tardifs. Cela étant, elle bénéficie d'une durée de vie technique plus longue et de retours élevés sur le capital investi grâce aux faibles coûts unitaires d'exploitation et de combustible. L'énergie nucléaire est une technologie mature mais relativement récente et dispose donc de nombreuses opportunités d'innovation pour son amélioration technique.

Compte tenu des préoccupations directement liées à sa nature, l'énergie nucléaire est une question délicate au niveau social et politique. Néanmoins, les aspects sociaux positifs de l'énergie nucléaire sur le développement économique local ou la sécurité d'approvisionnement peuvent jouer un rôle important dans l'acceptation de l'énergie nucléaire par la société et compenser dans une certaine mesure les préoccupations engendrées par les risques que le public pense qu'elle génère.

Schémas du développement nucléaire

Les rapports nationaux fournis par les participants à l'étude ont permis de dégager trois grands schémas de développement de l'énergie nucléaire : autonomie dès le début (REP et REB aux États-Unis, RELP au Canada et réacteurs à caloporteur gaz (RCG) au Royaume-Uni et en France) ; transfert de technologie de l'étranger puis développement autonome (par exemple, REP en France, au Japon et en République de Corée ou REB au Japon) ; et forte dépendance de l'étranger. Dans tous ces schémas

toutefois, l'impulsion des pouvoirs publics et la collaboration internationale ont toujours été déterminantes pour le succès du développement de l'énergie nucléaire.

Caractéristiques des systèmes d'innovation nucléaire

Éléments moteurs de l'innovation nucléaire : ces éléments diffèrent en fonction des technologies concernées, ainsi que de l'environnement national et international. Toutefois, il ne fait aucun doute qu'il existe certains éléments essentiels, que l'on peut grossièrement regrouper en trois catégories : les facteurs déterminant le marché, les facteurs socio-politiques et les facteurs techniques.

Principaux acteurs : l'innovation nucléaire fait intervenir de nombreux acteurs, comme les pouvoirs publics et l'administration, pour la politique et les règlements de sûreté, les exécutants de la R-D (organismes de recherche publique, organisations de recherche industrielle et universités, par exemple), les fournisseurs de systèmes/services (fournisseurs d'installations nucléaires, de composants, de combustible et sociétés d'ingénierie, par exemple) et les fournisseurs d'énergie (compagnies d'électricité et fournisseurs de chaleur, par exemple). Leurs rôles respectifs et l'intensité de leurs relations diffèrent selon les pays et ont changé suivant les évolutions de la situation mondiale et locale.

Cadres institutionnels : les innovations nucléaires s'effectuent dans divers cadres, notamment les politiques nationales, les programmes nucléaires nationaux, les mécanismes de financement, les mécanismes d'incitation à l'innovation, les partenariats public-privé (PPP), la collaboration internationale, ou encore, l'enseignement et la formation dans le domaine de l'énergie nucléaire. Ces cadres, généralement mis en place par les pouvoirs publics et les promoteurs de l'innovation nucléaire, génèrent un très grand nombre de mesures, qui diffèrent selon les pays. Dans certains d'entre eux, ces cadres sont génériques pour la science et la technologie, sans référence particulière au « nucléaire ».

Ressources humaines et infrastructure : la capacité d'une nation ou d'une entreprise à innover varie suivant qu'elle dispose ou non de ressources humaines qualifiées, de l'accès à des installations de R-D et des connaissances adéquates, d'une culture organisationnelle axée sur l'innovation, etc. Dans ce contexte, la collaboration internationale et intersectorielle prend de plus en plus d'importance.

Pratiques de gestion de programmes : pour gérer efficacement les programmes d'innovation, il faut un processus rigoureux de prospective et de planification, ainsi que des mécanismes d'évaluation et de contrôle appropriés, à cause notamment des nombreuses incertitudes et distorsions possibles dans le processus. Des opérations de prospective et de planification ont eu lieu dans de nombreux pays et des processus de contrôle s'instaurent actuellement sous diverses formes.

Cadres juridiques régissant l'énergie nucléaire : compte tenu des caractéristiques inhérentes à la technologie nucléaire, le développement de cette dernière doit être assuré dans le respect des cadres juridiques spécifiques aux règlements en matière de santé et de sûreté, de non-prolifération des armes nucléaires et de contrôles à l'exportation. Ces cadres juridiques bien établis à l'échelon national et international peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur l'innovation nucléaire.

Principaux facteurs de performance en matière d'innovation nucléaire

Bien que l'on puisse considérer le développement et le déploiement de l'énergie nucléaire dans son ensemble comme un processus d'innovation probant, les différentes approches innovantes dans le domaine de la technologie nucléaire n'ont pas toujours été concluantes. Nombre des raisons identifiées dans les études de cas pour expliquer ces développements moins aboutis sont similaires à celles

rencontrées dans d'autres secteurs technologiques ; ce sont, par exemple, le manque de compétitivité par rapport à d'autres alternatives déjà présentes sur le marché, le manque de focalisation sur un projet, l'incapacité à répondre aux exigences actuelles du marché, l'absence de participation de l'industrie dès un stade précoce, l'absence de critères de décision clairs pour stopper ou réorienter les activités de R-D, l'absence de processus de contrôle de l'utilisation des finances publiques, ainsi que des changements radicaux de l'environnement politique et économique, ou encore l'impossibilité de transposer les résultats de R-D à l'échelle industrielle. D'autres causes sont spécifiques au secteur nucléaire ; ce sont, par exemple, les incidences des accidents nucléaires (perte de compétitivité suite aux exigences plus sévères en matière de dispositifs de sûreté, décisions dictées par des considérations politiques), les délais de mise en œuvre trop longs, les préoccupations des pays limitrophes et notamment leurs mouvements antinucléaires.

Enjeux et recommandations

Aspects politiques : les pouvoirs publics désireux de voir l'énergie nucléaire continuer à jouer un rôle grandissant dans approvisionnement énergétique doivent proposer des politiques à long terme, dans un cadre réglementaire adéquat au plan national et international, et aussi fournir des aides financières pour le développement de systèmes d'énergie nucléaire innovants. Les pouvoirs publics doivent en particulier susciter l'innovation à chaque fois qu'il y a incertitude quant aux entités capable de la déclencher ou si aucun autre acteur économique ne semble prêt à exploiter les opportunités de marché qui semblent se présenter. La nature multidisciplinaire du développement de l'énergie nucléaire rend nécessaire une solide coordination de la part des pouvoirs publics. Une attention toute particulière doit également être accordée aux systèmes nationaux d'innovation dans leur ensemble. Ces derniers doivent en effet intégrer tous les domaines de la science et de la technologie et fournir un cadre au système d'innovation nucléaire. Les pouvoirs publics, les autorités de sûreté et l'industrie doivent veiller à ce que soient mis en place des politiques et des programmes de R-D nucléaire à court, moyen et long termes. Les organisations internationales peuvent fournir des plateformes pour assurer la coordination de ces politiques et programmes nationaux.

Prospective et planification : la concrétisation d'idées innovantes dans un environnement controversé exige une initiative et une orientation fortes s'inscrivant dans une approche globale : concernant les systèmes actuels, l'initiative doit émaner essentiellement de l'industrie ; pour les développements à long terme, l'orientation doit venir des pouvoirs publics ou des institutions publiques ; et pour les déploiements à moyen terme, un pilotage coordonné de l'industrie et des pouvoirs publics semble approprié. Dans la phase de prospective et de planification des programmes de RD-D nucléaire, il convient de définir, très tôt, des critères de succès et des étapes intermédiaires appropriées. Dans l'idéal, cela doit être fait avant le lancement des programmes. Les réalisations de ces derniers devront être périodiquement soumises à examen par un organisme indépendant. Dans ce type d'approche, les rôles respectifs des promoteurs et des exécutants de la R-D doivent être clairement définis dès le tout début.

Analyse de la demande : une évaluation du marché des produits envisagés par les promoteurs de l'innovation et les exécutants de la R-D doit intervenir aux premiers stades des projets de R-D à court et moyen termes, et les efforts doivent se concentrer sur les produits ayant de véritables perspectives sur le marché. Ces évaluations doivent être régulièrement actualisées.

Stratégie de R-D : la stratégie de R-D en faveur de systèmes nucléaires innovants doit s'appuyer sur une approche graduelle comportant des solutions à moyen terme, ainsi que des produits à long terme. Il ne suffit pas de se concentrer uniquement sur des solutions à long terme prometteuses sans proposer de résultats intermédiaires. S'il est judicieux de commencer par explorer un large éventail de

trajectoires technologiques pour être sûr de ne pas passer à côté de solutions optimales, toute stratégie doit comporter un processus d'affinage des choix possibles à un moment prédéfini et pas trop lointain. Elle doit également comporter des mesures appropriées permettant de renforcer la coopération avec le secteur de la R-D non nucléaire ; cela donne la possibilité d'accéder à des options technologiques inédites, mises au point dans d'autres secteurs, et de retombées non nucléaires pour la R-D nucléaire.

Financement : un financement public est nécessaire au début du processus d'innovation, mais il doit céder la place à un financement industriel par le biais d'un partenariat public-privé (PPP) dans une phase intermédiaire. En tout état de cause, le financement de la R-D axée sur l'innovation doit demeurer stable dans une perspective à long terme et ne pas être remis en cause ou revu, tant que les grandes étapes et les résultats intermédiaires attendus ne sont pas atteints. Les pouvoirs publics seront plus enclins à allouer des fonds à la R-D en faveur de solutions innovantes s'il existe un contrôle des développements et des résultats similaire à celui mis en place pour la R-D industrielle.

Ressources humaines et infrastructure : la R-D nucléaire nécessite des ressources spécialisées aussi bien en termes de personnel que d'infrastructure. Des stratégies nationales, notamment en matière de collaboration internationale, doivent être mises en place pour développer et préserver les connaissances, ainsi que pour élaborer et entretenir les infrastructures requises. La disponibilité et la mobilité des personnels spécialisés peuvent être améliorées par divers instruments, notamment la reconnaissance mutuelle des activités d'enseignement, de formation et de R-D de diverses institutions dans différents pays et un système d'accréditation reconnu et utilisé à l'échelon mondial. Des bases de données répertoriant les installations existantes et leurs capacités, les programmes de R-D en cours avec leurs grandes étapes et les résultats attendus, ainsi qu'un « carnet d'adresses » des experts avec leur domaine de spécialisation sont des outils à même de favoriser les échanges de savoir-faire et de connaissances, de faciliter le partage de l'infrastructure de R-D et de fournir des informations systématiques et actualisées sur les installations existantes, les activités de R-D en cours et les détenteurs du savoir.

Partenariats et groupes : les PPP entre les organismes de recherche publique et l'industrie offrent d'excellentes opportunités de réaliser un rapprochement entre la volonté d'innover des chercheurs et les problèmes concrets à résoudre. Pour faciliter les contacts entre institutions de recherche et partenaires industriels, il est souhaitable de mettre en place des institutions publiques appropriées, chargées de déclencher et promouvoir l'innovation, mais aussi d'encourager les chercheurs à se rapprocher de l'industrie, tout en réduisant les risques pour cette dernière, par l'apport de fonds de lancement durant les phases les plus aléatoires des activités de R-D pour l'innovation. Ces institutions peuvent avoir la charge de sensibiliser les clients potentiels à l'innovation et faire ainsi office de « comités de promoteurs ». Tous les secteurs assurant la promotion de la R-D nucléaire doivent travailler de manière coordonnée. Les centres de recherche doivent se spécialiser dans des domaines spécifiques et la constitution de groupes à l'échelon national et international doit être favorisée. Les promoteurs de l'innovation et l'industrie doivent encourager cette spécialisation en faisant appel à des centres de recherche particuliers pour des domaines bien précis.

Enseignement et formation : une R-D privilégiant des solutions originales aux problèmes actuels et futurs est un excellent moyen d'attirer de jeunes spécialistes. Les pouvoirs publics doivent non seulement faire en sorte de faciliter et promouvoir la R-D axée sur l'innovation, mais aussi s'assurer que des politiques et des programmes sont en place pour soutenir et encourager l'enseignement et la formation scientifique et technique, de sorte à contribuer au recrutement des ressources en personnel nécessaires pour la mise en œuvre des systèmes d'innovation nucléaire. De leur côté, l'industrie et les compagnies d'électricité doivent, dans leur propre intérêt, saisir l'opportunité de (co)financer un enseignement spécifique au nucléaire à tous les niveaux (techniques et scientifiques).

Réglementation de sûreté : les autorités de sûreté nucléaire devraient être associées en temps utile aux activités de développement, pour pouvoir se familiariser avec les nouvelles technologies et élaborer les méthodes et outils nécessaires à l'évaluation des nouveaux systèmes technologiques. Cela contribuerait à éviter les retards inutiles dans la délivrance des autorisations, susceptibles de décourager les utilisateurs potentiels de ces systèmes. L'harmonisation des réglementations des différents pays peut élargir le marché international des produits innovants et, par suite, rendre plus intéressants aux yeux des promoteurs potentiels les projets d'activités de R-D innovantes ou élargir le cercle des institutions intéressées par la collaboration internationale. Au vu de la nécessité d'une collaboration internationale soutenue, les autorités de sûreté devraient donc mettre l'accent à l'échelon national sur le respect des normes et codes internationaux. Ces dernières doivent en outre s'efforcer d'adopter elles-mêmes des approches innovantes en matière de réglementation.

Acceptation par le public : les promoteurs d'innovations technologiques doivent faire clairement et rapidement connaître les avantages des nouvelles technologies nucléaires, tout en indiquant de manière particulièrement claire leurs limites et ce qui ne sera jamais possible. Il faut éviter les promesses par trop optimistes quant à la disponibilité de ces technologies pour éviter la déception dans le grand public, la perte de crédibilité des promoteurs et l'obsolescence prématurée des systèmes en service actuellement. Cela étant, il convient d'adopter des approches innovantes en matière de communication pour promouvoir les futurs systèmes d'énergie nucléaire, qui ont à porter le poids de débats passés, éminemment polémiques, sur la technologie nucléaire.

Collaboration internationale : la collaboration internationale sera déterminante pour le succès des activités de R-D innovantes, car elle permet de partager les charges financières, d'optimiser l'utilisation des ressources existantes, d'éviter la duplication des efforts, d'exploiter les synergies, d'améliorer la mobilité des spécialistes et des connaissances. Les pouvoirs publics et les organisations internationales se doivent d'encourager et de faciliter la collaboration internationale dans le domaine des systèmes nucléaires innovants, ainsi que les échanges d'informations entre le plus grand nombre de secteurs différents, et notamment instaurer des règles de coopération claires et des instruments de coordination, sous l'égide d'organes internationaux formés de représentants d'entités des pouvoirs publics et de l'industrie. Au niveau institutionnel, il est souhaitable que des échanges d'informations mutuels et systématiques s'opèrent concernant les programmes de R-D nationaux, afin que la communauté internationale soit au courant des programmes de R-D en cours et que les instituts de recherche soient disposés à y participer.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Comme chacun sait, l'innovation technologique est l'une des clés d'une croissance économique et d'une compétitivité durables sur les marchés internationaux et elle devrait apporter une partie des solutions à de nombreux défis actuels et futurs à l'échelon planétaire. Cela s'applique également dans le cas de l'énergie nucléaire.

L'innovation a été un élément moteur du succès de l'énergie nucléaire et demeure essentielle à sa pérennité. L'énergie nucléaire est une solution séduisante pour assurer la diversité et la sécurité de l'approvisionnement énergétique, ainsi que pour réduire les risques liés au changement climatique planétaire. Tous les systèmes énergétiques doivent répondre aux besoins et aux attentes de la société, tels que respect de l'environnement, la sécurité et la fiabilité, et la compétitivité économique. Aujourd'hui, l'énergie nucléaire se classe en bonne position par rapport à toutes ces exigences.

Récemment, plusieurs pays membres de l'OCDE/AEN ont engagé des efforts à l'échelon national et international, afin de définir des objectifs et des lignes directrices pour le développement de technologies nucléaires innovantes. En particulier, le Forum international Génération IV (GIF), regroupant 11 pays membres, élabore des programmes internationaux conjoints pour le développement des systèmes nucléaires de génération IV (cf. encadré 1.1), censés pour l'essentiel disposer de caractéristiques *révolutionnaires* exigeant de considérables innovations technologiques¹. Par ailleurs, 26 pays participent au Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), projet principalement axé sur les exigences des utilisateurs et la méthodologie d'évaluation des réacteurs et des cycles du combustible nucléaires innovants².

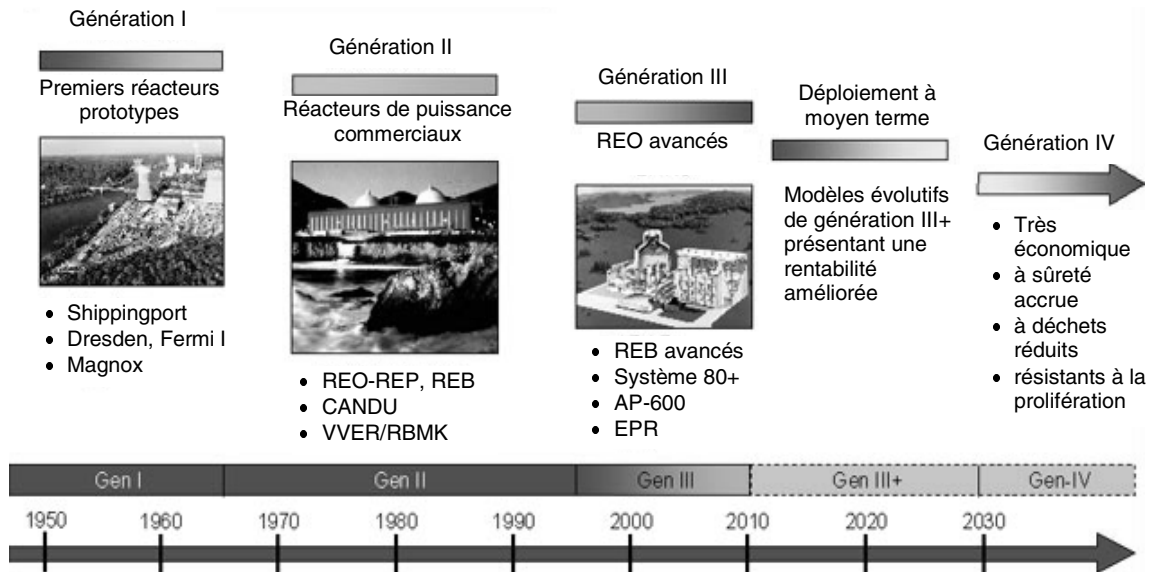
Savoir comment promouvoir l'innovation nucléaire est un enjeu majeur pour l'industrie et les gouvernements intéressés. En particulier, si les technologies qui doivent être mises au point sont révolutionnairement différentes des technologies existantes, le processus doit être géré de manière efficace et rigoureuse suivant les pratiques de RDD-D (recherche, développement, démonstration et déploiement) en vigueur en matière nucléaire. Pour les pouvoirs publics qui ont décidé de cesser graduellement l'exploitation des centrales nucléaires dans leurs pays, l'innovation nucléaire peut rester intéressante dans le domaine du déclassement et de l'évacuation des déchets.

Pour que le secteur nucléaire connaisse plus d'innovations, il est vital de multiplier et d'approfondir les débats sur les façons de promouvoir l'innovation dans le domaine nucléaire et il est indispensable d'étoffer nos connaissances en matière de systèmes d'innovation relatif au secteur nucléaire. Avec ce type de données, les résultats en matière d'innovation dans le nucléaire pourraient être nettement améliorés, de manière similaire à ce qui s'est produit dans des secteurs tels que les biotechnologies ou les technologies de l'information et de la communication. Il convient de noter que

-
1. Pour plus d'informations sur le GIF, voir section 4.3.1.1 du chapitre 4.
 2. Pour plus d'informations sur le projet INPRO, voir section 4.3.1.2 du chapitre 4.

parmi les nombreuses idées innovantes proposées dans le secteur nucléaire, nombre d'entre elles n'ont pas été diffusées à l'échelle industrielle.

Encadré 1.1 Évolution des réacteurs nucléaires



Génération I : réacteurs commerciaux prototypes des années 1950 et 1960. Ils sont relativement peu nombreux à être encore en exploitation aujourd'hui.

Génération II : réacteurs commerciaux déployés dans les années 1970 et 1980 et qui sont encore en exploitation aujourd'hui. Le plus souvent, ils utilisent du combustible à l'uranium enrichi et de l'eau comme modérateur et caloporteur. Ils regroupent les réacteurs à eau ordinaire (REO), tels les REB et REP. Le combustible, des pastilles de dioxyde d'uranium, est généralement enfermé dans de longs crayons en alliage de zirconium. La teneur en uranium 235 est portée de 0.7 % à l'état naturel à 3.5 à 5.0 %. Les réacteurs gaz-graphite avancés (AGR) au Royaume-Uni, les réacteurs CANDU modérés avec de l'eau lourde au Canada, ainsi que les VVER et RBMK en Russie sont de génération II.

Génération III : réacteurs *évolutifs* conçus dans les années 1990 présentant de nets progrès en matière de sûreté et de rentabilité. Dits de conception avancée, ces réacteurs regroupent les réacteurs à eau bouillante et à eau sous pression avancés. Le réacteur EPR (European pressurised reactor ou Réacteur à eau pressurisé européen) appartient également à cette catégorie. Résultant d'évolutions apportées aux réacteurs de génération II, ils présentent une sûreté améliorée.

Génération III+ : réacteurs *évolutifs* qui pourraient être déployés autour de 2010. En phase de développement dans les années 1990, ils sont aujourd'hui à divers stades de conception et de mise en œuvre. De conception plus simple, ils disposent de dispositifs de sûreté renforcés, notamment, de systèmes de sûreté passive. Ces caractéristiques technologiques pourraient laisser présager ce que seront les réacteurs de génération IV.

Génération IV : réacteurs *révolutionnaires* qui disposeront de technologies du cycle du combustible innovantes et seront probablement déployés d'ici 2040. Ils devraient être très économiques, présenter une sûreté accrue, générer un minimum de déchets et être résistants à la prolifération. Ils devraient en règle générale avoir des cycles du combustible fermés et brûler les actinides à vie longue : ils devraient autoriser le recyclage en bloc tous les actinides (et non pas uniquement du plutonium et potentiellement de l'uranium). Nombre d'entre eux seront des réacteurs à neutrons rapides.

De nombreuses études ont été réalisées sur les procédés d'innovation et les systèmes nationaux d'innovation (SNI), en particulier dans le cadre de l'OCDE. Le Comité de la politique scientifique et technologique (CPST) de l'OCDE et son groupe de travail sur la politique de l'innovation et de la technologie (TIP) ont réalisé de nombreux projets concernant les SNI depuis 1995, et notamment des études de cas sur des activités de service à forte intensité de connaissances, l'énergie et la biotechnologie pharmaceutique. Toutefois, il n'y a pas eu d'étude de ce type concernant l'innovation dans la technologie nucléaire.

Bien des pays membres de l'OCDE ont manifesté beaucoup d'intérêt dans la mise en place et la consolidation de leurs SNI, ce qui implique de nombreuses mesures politiques pour renforcer l'innovation technologique au niveau national. L'innovation nucléaire doit faire partie des aspects à prendre en considération dans la mise en place et la consolidation des SNI. Ce qui exige des communications étroites entre les divers secteurs, dont le nucléaire.

Au vu de ce qui précède, le comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) a décidé d'inscrire une étude sur « L'innovation technologique dans l'énergie nucléaire » dans le cadre de son programme de travail 2005-2006.

1.2 Objectifs

L'objectif général du NDC est de conseiller les pays membres sur les questions de politique en matière d'énergie nucléaire. Dans ce cadre, la présente étude se concentre sur les moyens de promouvoir l'innovation dans le développement des systèmes électronucléaires.

L'étude poursuit les trois objectifs suivants :

- Examiner les caractéristiques spécifiques des systèmes d'innovation nucléaire, notamment les acteurs de l'innovation et leurs relations, les procédés et les infrastructures d'innovation, ainsi que les cadres institutionnels qui influent sur les résultats obtenus par ces systèmes.
- Analyser les réalisations et les expériences en matière d'innovation dans le secteur nucléaire, notamment les bonnes pratiques d'innovation, les obstacles à l'innovation et les imperfections des systèmes dans les pays membres. Cette analyse conduit à l'identification des principaux facteurs à l'origine des succès et des échecs.
- Définir des recommandations politiques pour améliorer les résultats obtenus par les systèmes d'innovation nucléaire.

Les recommandations de cette étude, si elles sont bien suivies par les entités organisationnelles compétentes, devraient aider à favoriser l'innovation dans le secteur nucléaire, contribuer à améliorer les performances des systèmes nucléaires avancés, faciliter une plus grande harmonisation au sein du secteur nucléaire et entre ce secteur et les autres, et promouvoir une collaboration internationale accrue. La description des efforts pour le développement de technologies nucléaires innovantes à l'échelon national et international devrait sensibiliser davantage le public au potentiel d'innovation des systèmes électronucléaires et élargir ainsi les perspectives d'investissement en leur faveur. Cette étude est également l'occasion d'engager des débats publics plus approfondis sur les thèmes de l'innovation nucléaire, débats qui pourraient donner une plus grande visibilité et transparence à la RDD-D dans ce domaine.

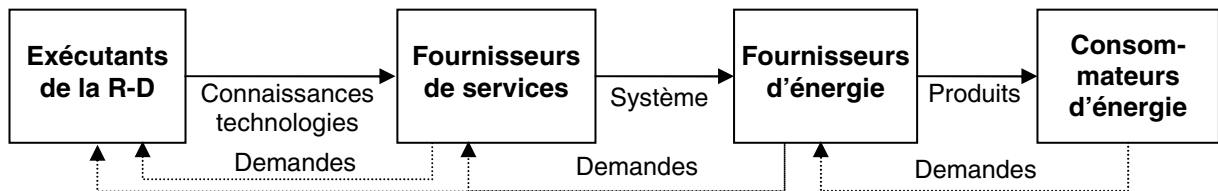
1.3 Champ

L'étude porte essentiellement sur les technologies émergentes mais présente quelques études de cas historiques. Elle couvre les réacteurs et les cycles du combustible, la sûreté nucléaire et la gestion des déchets radioactifs, mais pas les domaines des applications des radio-isotopes et des rayonnements, de la fusion nucléaire et de la propulsion spatiale.

L'innovation est un concept très large, englobant toute une série d'activités diverses. Elle peut prendre de multiples formes ; elle peut aussi bien concerner l'organisation que la technologie. L'étude s'intéresse uniquement à l'innovation technologique telle que définie au chapitre 2, notamment à l'innovation en termes de produits mais aussi de procédés.

Pour préciser le champ d'application de l'étude, une chaîne logistique simplifiée concernant les systèmes électronucléaires est présentée figure 1.1.

Figure 1.1 Chaîne logistique simplifiée dans le secteur de l'énergie nucléaire



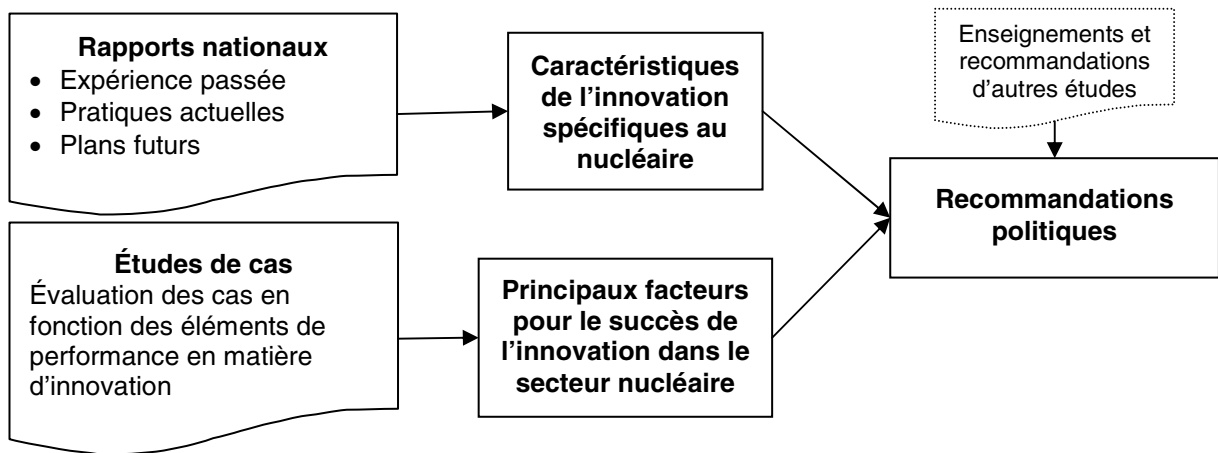
Les consommateurs obtiennent auprès des fournisseurs d'énergie les biens (électricité, chaleur, hydrogène, par exemple) dont ils ont besoin. Les fournisseurs d'énergie tirent les capacités de production énergétique des systèmes d'énergie (par exemple, centrales nucléaires et combustible approprié, centrale de production de chaleur, usine à hydrogène, usine de dessalement) procurés par les fournisseurs de systèmes/services. Ces derniers, ainsi que les fournisseurs d'énergie, se procurent les connaissances et les technologies requises auprès des exécutants de la R-D. Les pouvoirs publics peuvent influencer directement ou indirectement sur tous ces acteurs. Bien qu'il soit dans la réalité possible qu'une même organisation assure plusieurs fonctions (fournisseur d'énergie, fournisseur de systèmes/services et exécutant de la R-D), pour les besoins de cette étude, on a supposé que chaque fonction est assumée par un acteur différent.

La figure 1.1 montre l'existence de trois types de marché : marché des produits énergétiques ; marché des systèmes énergétiques ; et marché des technologies. Dans le premier, le consommateur choisit une des possibilités parmi celles qui lui sont proposées. Dans le deuxième marché également, les fournisseurs d'énergie disposent de plusieurs possibilités. Pour déployer un système d'énergie nucléaire, il est nécessaire de bien connaître les caractéristiques du marché correspondant, les acteurs intervenant sur ce dernier, ainsi que leurs relations et les directives associées. L'analyse ne doit pas porter uniquement sur les marchés actuels mais inclure les marchés futurs.

1.4 Approche

Pour réaliser les trois objectifs évoqués plus haut, l'étude se base pour l'essentiel sur deux sources d'information – les rapports nationaux et les études de cas fournies par les représentants de pays participants – comme indiqué figure 1.2.

Figure 1.2 Approche utilisée dans l'étude



Un groupe *ad hoc* formé d'experts en gestion de R-D et en innovation venant de dix pays (Belgique, Canada, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, République de Corée, République tchèque, Suisse)³ et d'EURATOM a été constitué en octobre 2004 (voir annexe A); l'AIEA a participé aux travaux du groupe. Le Groupe s'est réuni quatre fois entre octobre 2004 et mai 2006. Tous les pays participants ont soumis un rapport national et des études de cas, dont le groupe et le secrétariat ont fait la synthèse, en identifiant les ressemblances et les différences entre les systèmes des différents pays et en dégagant les principaux facteurs pour que l'innovation nucléaire soit un succès. À partir de ces analyses, le Groupe a émis des recommandations politiques pour les décideurs concernant l'innovation technologique dans le secteur de l'énergie nucléaire.

3. Les experts de l'Allemagne et de l'Australie ont assisté à la première réunion, mais ils ont décidé de ne pas participer à l'étude à l'issue de cette même réunion.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Acception courante des concepts d'*innovation* et de *systèmes d'innovation*

2.1.1 *Innovation*

2.1.1.1 *Définition*

Pour étudier l'*innovation* dans la technologie de l'énergie nucléaire, il convient dans un premier temps de définir précisément ce qu'est l'*innovation*, car ce concept a des implications dépassant le développement de technologies innovantes. En tenant compte des définitions de l'encadré 2.1, l'étude définit tout d'abord l'*innovation* à travers ses résultats qui doivent :

- être des produits (ou procédés) nouveaux ou sensiblement améliorés¹, et
- apporter des avantages économiques et/ou sociaux par leur introduction sur le marché (ou leur utilisation au sein d'une entreprise).

Du second point ci-dessus, il ressort que l'on différencie l'*innovation* de l'*invention*, laquelle peut simplement signifier élaboration d'idées et de techniques nouvelles. L'*innovation* suppose donc une série précise d'activités grâce auxquelles un produit nouveau ou sensiblement amélioré est introduit sur le marché². La plupart des programmes de R-D n'ont pas uniquement pour objectif l'*invention* mais l'*innovation*, ce qui demande des efforts au delà de ceux de R-D. Dans de nombreux cas, on réussit à *inventer*, sans parvenir à *innover*.

Aussi, lorsque nous ferons référence au résultat de l'*innovation*, nous utiliserons l'expression « produit innovant ». Dans le même contexte, des expressions du type « idée innovante », « concept innovant » et « technologie innovante » peuvent être utilisées³. Lorsque nous ferons référence aux activités concernant l'*innovation*, nous utiliserons dans cette étude l'expression « activités innovantes ». Lorsqu'un produit innovant est introduit sur le marché, on peut dire que des « activités innovantes ont atteint leur but et donné naissance à un produit innovant »⁴.

-
1. L'expression « nouveau ou sensiblement amélioré » s'applique au sein d'une entreprise (ou d'un pays). L'article doit être nouveau pour l'entreprise, mais pas nécessairement sur le marché. Ainsi, un réacteur à eau pressurisée (REP) n'est pas un produit innovant dans un pays qui en fabrique déjà par lui-même, mais il est innovant dans un pays où il est introduit pour la première fois.
 2. Toutefois, cela ne signifie pas qu'une entreprise (ou un pays) exerce seul(e) l'ensemble de ces activités. Des produits innovants peuvent être développés par l'entreprise même ou par une entreprise sous son contrôle.
 3. Par exemple, le REP était un produit innovant dans les années 1960, mais plus dans les années 1980. Le réacteur EPR est un produit innovant, actuellement introduit sur le marché et en phase de déploiement. AP1000 est un produit innovant, qui devrait être introduit sur le marché. Les systèmes de génération IV sont des « concepts innovants » et seront des « produits innovants » après démonstration et usage commercial.
 4. Les activités visant à innover avec le REP aux États-Unis dans les années 1960 ont abouti. Les activités innovantes menées en France pour introduire le REP ont été différentes de celles conduites aux États-Unis.

Encadré 2.1 Définitions de l'innovation dans d'autres études

- « Conversion des nouvelles connaissances en bénéfices économiques et sociaux » [1].
- « Entrée réussie d'un nouveau produit issu d'une nouvelle science ou technologie sur un marché particulier » [2].
- « Un produit (bien ou service) nouveau ou sensiblement amélioré introduit sur le marché ou l'introduction au sein d'une entreprise d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré » [3].
- « Exploitation commerciale réussie de nouvelles technologies, idées ou méthodes à travers l'introduction de nouveaux produits ou procédés, ou l'amélioration de produits ou procédés existants » [4].
- « L'innovation c'est le renouvellement et l'élargissement de la gamme des produits et services et des marchés associés ; la mise en place de nouvelles méthodes de production, d'approvisionnement et de distribution ; l'introduction de changements dans la gestion, l'organisation du travail ainsi que dans les conditions de travail et les qualifications des travailleurs » [5].
- « Une innovation est la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques de l'entreprise, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures » [6].

En 2005, l'OCDE et EUROSTAT ont élaboré un manuel sur l'innovation, le « Manuel d'Oslo » [6], dans lequel ils distinguent en outre quatre types d'innovations :

- ✓ *Innovation de produit* : une innovation de produit correspond à l'introduction d'un bien ou d'un service nouveau ou sensiblement amélioré sur le plan de ses caractéristiques ou de l'usage auquel il est destiné. Cette définition inclut les améliorations sensibles des spécifications techniques, des composants et des matières, du logiciel intégré, de la convivialité ou autres caractéristiques fonctionnelles.
- ✓ *Innovation de procédé* : une innovation de procédé est la mise en oeuvre d'une méthode de production ou de distribution nouvelle ou sensiblement améliorée. Cette notion implique des changements significatifs dans les techniques, le matériel et/ou le logiciel.
- ✓ *Innovation d'organisation* : une innovation d'organisation est la mise en oeuvre d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques, l'organisation du lieu de travail ou les relations extérieures de la firme.
- ✓ *Innovation de commercialisation* : une innovation de commercialisation est la mise en oeuvre d'une nouvelle méthode de commercialisation impliquant des changements significatifs de la conception ou du conditionnement, du placement, de la promotion ou de la tarification d'un produit.

L'étude porte sur les activités innovantes, qu'elles aient abouties ou non, concernant des produits innovants, qu'ils aient ou non déjà été introduits sur le marché.

2.1.1.2 Caractéristiques générales de l'innovation

Pour promouvoir l'innovation, il est essentiel de bien la comprendre, et surtout d'en appréhender les caractéristiques qui s'appliquent à tous les secteurs. Le « Manuel d'Oslo » [6] donne une bonne description des caractéristiques générales de l'innovation.

L'innovation va de pair avec l'incertitude quant aux intrants et aux résultats des activités innovantes. On ne peut savoir à l'avance avec certitude si la R-D débouchera sur la mise au point réussie d'un produit innovant commercialisable, ni combien de temps et de ressources seront nécessaires pour son développement, ni dans quelle mesure il aura du succès. L'innovation comporte donc toujours un risque.

L'innovation n'est pas gratuite. Elle implique un investissement, qui peut prendre la forme d'une acquisition de biens matériels et immatériels ainsi que d'autres activités, comme le versement de salaires ou l'achat d'équipement ou de services, activités qui peuvent donner des retours sur investissement à l'avenir. Souvent, le manque de financement ou de ressources constitue un frein sérieux à l'innovation.

L'innovation s'accompagne de retombées. Le bénéfice d'une innovation créatrice est rarement entièrement accordé à la firme qui invente. Les firmes qui adoptent l'innovation d'autres firmes peuvent bénéficier des retombées du savoir ou de l'exploitation de l'innovation originale. Pour certaines activités innovantes, les coûts d'imitation étant nettement inférieurs aux coûts de développement, un mécanisme d'appropriation efficace, qui incite à innover, peut s'avérer nécessaire.

L'innovation implique l'utilisation d'un nouveau savoir ou une nouvelle utilisation, ou combinaison, de savoirs existants. Le nouveau savoir peut être soit créé par la firme novatrice dans le cadre de ses propres activités innovantes, soit acheté à l'extérieur par divers canaux (achat d'une nouvelle technologie, par exemple). Les organisations dont le rôle est d'utiliser un savoir pour exploiter de nouvelles opportunités sont à même de combiner les différentes sources de savoir. L'OCDE [4] décrit les processus d'innovation sous l'angle de la gestion du savoir comme suit :

Production du savoir : le savoir peut être créé par un individu ou par des réseaux, officiels ou non, faisant intervenir des organisations qui peuvent appartenir à des secteurs institutionnels, des domaines scientifiques et technologiques, des régions et des pays différents. Formalisés ou bien tacites, les savoirs générés peuvent prendre diverses formes, depuis des résultats scientifiques jusqu'à des développements technologiques. Les organismes de recherche et les constructeurs sont généralement du côté de l'offre, car ils génèrent du savoir.

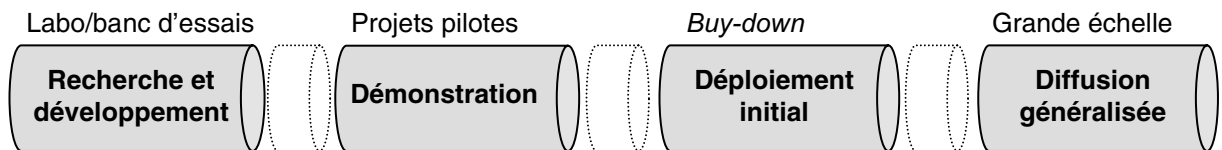
Diffusion du savoir : la diffusion du savoir englobe les échanges d'informations ainsi que les flux de savoir-faire scientifiques et technologiques entre les institutions (ou en leur sein). Ces flux peuvent résulter de transactions informelles ou être organisées par le marché et d'autres mécanismes officiels. Les nouveaux savoirs peuvent provenir de sources aussi diverses que le système scientifique public ou les entreprises innovantes concurrentes. Le savoir peut être diffusé par divers canaux (brevets, publications scientifiques, fourniture de matériel, contacts informels, séminaires et conférences, recherche en collaboration, mobilité du personnel de R-D) faisant intervenir toute une série d'acteurs, issus de différents secteurs institutionnels et branches d'activité industrielle, ainsi que de divers domaines. En l'occurrence, ce sont les institutions d'enseignement et de formation qui transmettent le savoir (en le créant et en l'utilisant), dans le but de préparer la prochaine génération de fournisseurs et d'utilisateurs de savoir.

Exploitation du savoir : le fait que le savoir créé par un acteur puisse être diffusé de manière involontaire ou intentionnelle ne signifie pas qu'il puisse être immédiatement assimilé et utilisé par d'autres. D'une part, l'aptitude d'une institution à assimiler un savoir venant de l'extérieur dépend de ses propres compétences et savoir-faire, et aussi de sa faculté à mettre en place les capacités de base requises pour exploiter ce savoir. D'autre part, lorsqu'un savoir est protégé par des droits de propriété intellectuelle (DPI), les autres doivent obtenir le droit de l'utiliser pour pouvoir l'exploiter. Les compagnies d'électricité et les autorités de sûreté sont en règle générale du côté de la demande, car elles utilisent le savoir.

2.1.1.3 Activités d'innovation

Comme indiqué figure 2.1, les principales phases de l'innovation sont la recherche fondamentale (production de nouveau savoir), le développement (vérification du principe ou du concept, mise au point du prototype), la démonstration, le déploiement initial et la diffusion généralisée.

Figure 2.1 Représentation simplifiée des différents stades de l'innovation



Adapté de Holdren, J.P. (1999), « Foundations of International Cooperation on Energy Innovation », chapitre 3 dans *Powerful Partnerships: The Federal Role in International Cooperation on Energy Innovation*. Washington, D.C.: Executive Office of the President of the United States.

Recherche et développement : c'est l'univers de la recherche fondamentale et du développement conceptuel. C'est à ces différents stades que naissent les idées ou les concepts innovants.

Démonstration : la phase de démonstration consiste généralement à élaborer un ou plusieurs systèmes cibles de taille croissante pour établir la viabilité de la technologie sur le plan technique et éventuellement commercial. C'est le stade de l'invention, qui permet d'accéder à la transition vers l'innovation.

Déploiement initial : une fois la démonstration d'un produit innovant effectuée à une échelle commerciale potentiellement viable, il reste un long processus qui consiste à élaborer une série de systèmes cibles, afin d'amener les capacités de production à l'échelle requise et d'apprendre comment réduire les coûts (production, installation, exploitation et maintenance des systèmes) à des niveaux compétitifs. Pour positionner une nouvelle technologie sur le marché, il faut couvrir des coûts initialement plus élevés que ceux des produits concurrents. Au fur et à mesure que le volume cumulé de production augmente, les coûts sont progressivement réduits jusqu'à ce que certaines technologies innovantes finissent par concurrencer pleinement les technologies traditionnelles. Le processus consistant à payer la différence entre le coût de la nouvelle technologie innovante et le coût des technologies concurrentes est appelé *buy-down* de la phase de déploiement initial. C'est à ce moment qu'une analyse de rentabilité peut être validée et éventuellement commencer à attirer les volumes de capitaux suffisants au lancement de la production initiale et de la commercialisation.

Diffusion généralisée : une fois qu'un produit innovant est passé par les phases de R-D, démonstration et déploiement initial de la chaîne de la figure 2.1, il est prêt à une diffusion

généralisée. Les investisseurs peuvent alors espérer commencer à récolter les fruits de leurs investissements.

Tout au long des phases représentées sur la figure 2.1, on retrouve dans les activités innovantes toutes les étapes scientifiques, technologiques, organisationnelles, mercatiques, financières et commerciales, notamment l'investissement dans un nouveau savoir, qui conduisent ou sont censées conduire à la mise en œuvre de produits innovants. La transition entre les phases est particulièrement difficile, car les principaux acteurs intervenant dans chacune d'elles sont différents, tout comme leurs intérêts.

L'innovation peut par ailleurs également inclure les activités suivantes : [3]

- acquisition de R-D extérieure (d'autres entreprises, instituts de recherche ou organismes publics) ou de savoir sous la forme de produits sous licence, de brevets ou de droits de propriété industrielle ;
- achat de machines et de matériel conduisant plus particulièrement à l'introduction ou à la mise en œuvre d'innovations ;
- formation des membres du personnel visant à les doter des capacités de base nécessaires à la mise au point ou à l'introduction de produits et de procédés innovants ; et
- étude de marché ou publicité liée à l'introduction d'un produit sur ce marché.

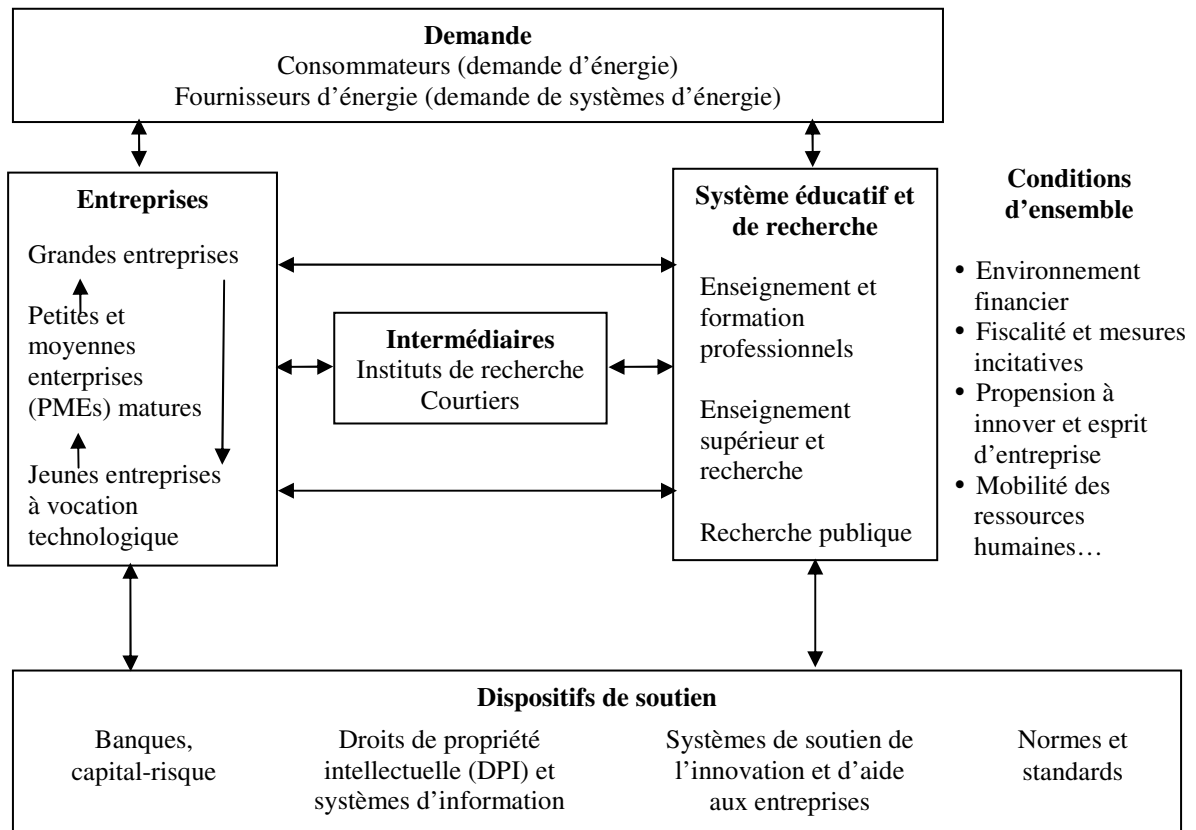
2.1.2 Système d'innovation

À elles seules, de brillantes idées ne suffisent pas à engendrer l'innovation. Celle-ci doit passer par une série de phases, notamment les activités de RDD-D et faire intervenir de nombreux acteurs reliés entre eux. Elle comprend une série d'activités indispensables, qui doivent être menées en synergie pour que la mise en œuvre d'un produit innovant soit réussie. La combinaison de ces activités, dont chacune fait intervenir des personnes générant et utilisant du savoir et de l'information, doit donc être considérée comme un système, en l'occurrence le système d'innovation. Dans cette perspective, on peut dire que les systèmes d'innovation nucléaire sont ceux qui permettent de mener à bien l'innovation dans les systèmes d'énergie nucléaire.

Examinant le système d'innovation à un niveau national, l'OCDE [8] définit un *système national d'innovation* comme « l'ensemble d'institutions distinctes qui conjointement et individuellement contribuent au développement et à la diffusion des nouvelles technologies et qui fournissent le cadre dans lequel les gouvernements forment et mettent en œuvre des politiques pour influencer le processus d'innovation. En tant que tel, c'est un système d'institutions interconnectées, qui créent, accumulent et transfèrent le savoir, les compétences et les artefacts définissant les nouvelles technologies ». La figure 2.2 présente un système d'innovation. Il convient de noter que « les performances en matière d'innovation ne dépendent pas seulement des performances de protagonistes spécifiques, mais aussi de leurs interactions en tant qu'éléments d'un système d'innovation, aux niveaux local, national et international » [8].

Cette étude considère le système d'innovation nucléaire comme un système sectoriel, intégré dans le système national d'innovation dans son ensemble. Le système national d'innovation fournit au système d'innovation nucléaire un cadre plus large, notamment des politiques d'innovation générales, un environnement financier, des DPI, etc.

Figure 2.2 Composants et liens d'un système d'innovation



Adapté de OCDE (2002), « Lignes directrices pour la réalisation d'études de cas dans le domaine de l'innovation », DSTI/STP/TIP(2002)1.

2.2 Synthèse des rapports nationaux

Comme indiqué figure 1.2, l'étude s'appuie sur les données et les informations concernant les systèmes d'innovation des pays membres, lesquelles sont essentiellement tirées des rapports nationaux élaborés par les membres du Groupe d'experts *ad hoc*. Ainsi les expériences et les pratiques exemplaires d'innovation sont partagées par l'ensemble des pays.

Pour une synthèse efficace et rigoureuse des rapports nationaux, les membres du Groupe ont défini d'un commun accord leur contenu : introduction et contexte national ; expérience nationale du développement de l'énergie nucléaire; système actuel d'innovation nucléaire national et principaux acteurs, politiques associées, infrastructures et processus de RD-D ; programmes nationaux d'innovation à l'avenir ; et enfin, conclusion et possibilités d'amélioration⁵.

Au vu des situations et contextes différents dans les divers pays, le Groupe a configuré des schémas de développement nucléaire, identifié les similitudes et différences entre les systèmes d'innovation nucléaire nationaux existants et énoncé des recommandations pour leur amélioration.

5. La table des matières détaillée des contenus est donnée dans l'annexe C.

Chaque rapport national est disponible sur le site web de l'AEN associé à ce même rapport www.nea.fr/download/innovation.

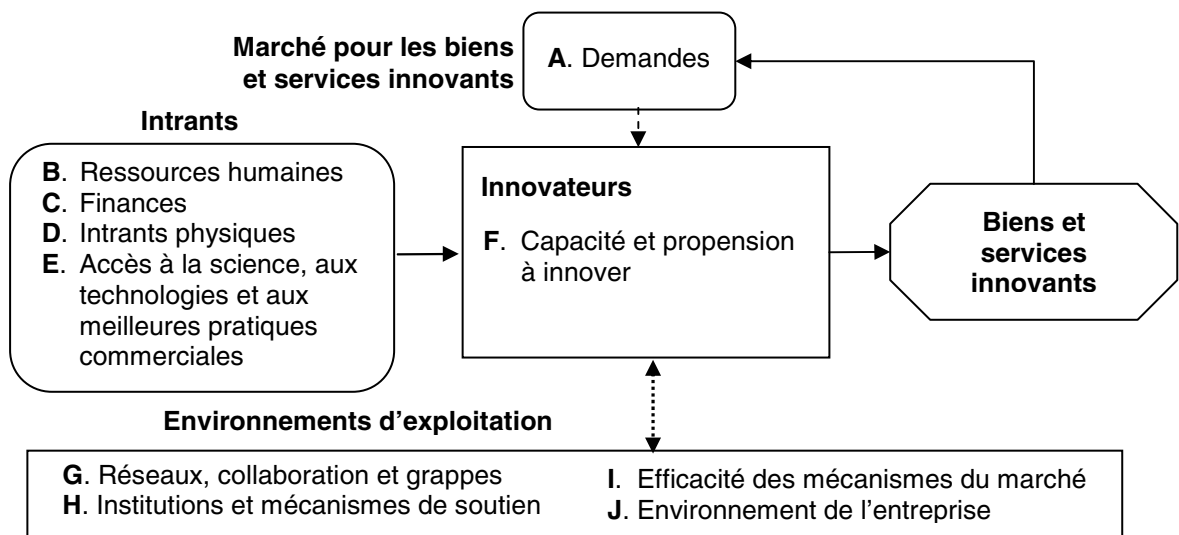
2.3 Analyse des études de cas

Afin d'identifier les facteurs déterminant les résultats en matière d'innovation nucléaire à partir des expériences passées, l'étude inclut des analyses de divers cas de réussite ou d'échec dans les pays participants.

2.3.1 Cadre conceptuel

L'étude suit la méthodologie proposée par l'OCDE [10], qui identifie dix éléments supposés déterminer les résultats de l'innovation au niveau national. Ces dix éléments peuvent être représentés comme dans la figure 2.3 et être appliqués aux cas de cette étude avec quelques modifications.

Figure 2.3 Éléments déterminant les résultats en matière d'innovation



Adapté de OCDE (2003), « La politique de l'innovation vue sous l'angle stratégique : Méthode proposée pour l'évaluation de la politique de l'innovation et des performances », DSTI/STP/TIP(2003)4.

A. Demandes

Cet aspect couvre la disposition et la capacité des clients potentiels (consommateurs, fournisseurs d'énergie, fournisseurs de systèmes et/ou organisations du secteur public) à acheter les produits et les services innovants. La propension des consommateurs à acheter des produits et des services nouveaux dépend généralement de la culture nationale, du revenu par habitant, etc., tandis que celle des entreprises dépendra beaucoup plus de leurs systèmes d'innovation ; plus les entreprises sont innovantes, plus elles achèteront d'intrants novateurs à leurs fournisseurs. Toutefois, les responsables de l'élaboration des politiques de l'innovation s'intéresseront particulièrement aux marchés publics lorsque les pouvoirs publics ont une influence directe sur ces marchés et peuvent générer une demande en éléments innovants.

B. Ressources humaines

Cet aspect concerne l'offre en scientifiques et ingénieurs qualifiés, artisans, techniciens et cadres bien formés et entraînés. Les politiques des pouvoirs publics liées à l'enseignement supérieur, la formation et la recherche universitaire peuvent avoir une grande influence sur la disponibilité de ressources humaines formées dans le pays. Les politiques liées à l'immigration peuvent influencer la mobilité internationale et les flux entrants et sortants de main-d'œuvre.

C. Ressources financières

Cet aspect concerne la capacité des entreprises à produire des ressources financières internes suffisantes et à les affecter de manière efficace aux activités dans le domaine de l'innovation, et à mobiliser des ressources financières externes pour l'innovation à des conditions satisfaisantes et qui répondent à leurs besoins particuliers. Les pouvoirs publics fournissent souvent des ressources financières pour l'innovation dans les entreprises, soit directement à travers la R-D et des subventions à l'innovation (parfois en relation avec des besoins spécifiques des pouvoirs publics) ou indirectement à travers des incitations fiscales ou d'autres moyens. Toute une série de mesures des pouvoirs publics peut influencer sur la disponibilité de ressources financières externes, notamment pour les jeunes entreprises technologiques.

D. Intrants physiques

Cet aspect désigne la facilité avec laquelle des entreprises installées dans le pays peuvent obtenir des fournitures de composants, matériaux, services, biens d'équipement et logiciels informatiques. Toutes les entreprises seront inévitablement dépendantes dans une grande mesure de fournitures provenant de l'étranger bien que, dans le cas de certains pays de l'OCDE, ces fournitures puissent être obtenues à l'intérieur de grappes régionales transfrontières.

E. Accès à la science, aux technologies et aux meilleures pratiques commerciales

Cet aspect inclut les sources de connaissances scientifiques et technologiques et de connaissances connexes en matière de meilleures pratiques commerciales et industrielles et les moyens par lesquels les entreprises peuvent y accéder. Ces sources seront les universités, les entreprises de services de R-D, les organisations d'appui régionales et locales en matière de R-D, les clients, les fournisseurs et les autres entreprises en général, les programmes internationaux de collaboration, les organisations d'appui aux activités commerciales et industrielles telles que les chambres de commerce ainsi qu'une série de programmes publics. Les moyens seront les réseaux et les grandes grappes, les chaînes d'approvisionnement, les séminaires, les expositions, les licences, les publications, la mobilité du personnel qualifié, les programmes publics de soutien, etc.

F. Capacité et propension des entreprises à innover

Cet aspect concerne la capacité des entreprises à utiliser des ressources externes (personnes, ressources financières, technologies, fournitures achetées) pour mettre au point des produits, des procédés et des services à forte valeur ajoutée qui répondent aux besoins des clients, et à générer les revenus nécessaires pour financer leurs activités. Cet aspect comprendra l'efficacité des processus internes d'innovation et des autres processus commerciaux et industriels ainsi que la capacité des

entreprises à mettre en place des structures organisationnelles, des modes de travail et une culture efficaces qui permettent aux cadres et aux travailleurs d'utiliser leurs capacités au maximum et les encouragent à le faire. La capacité des entreprises à interagir efficacement avec leur environnement extérieur, à identifier et à rechercher les intrants dont elles ont besoin et à formuler des stratégies appropriées pour leur survie, pour leur croissance et pour faire face au changement est elle aussi vitale.

I. Institutions et mécanismes de soutien

Cet aspect concerne un large éventail d'organisations, d'établissements et de systèmes. Les plus importants par rapport à l'innovation sont les universités, les organismes publics de recherche (OPR), les organisations qui fournissent un appui en matière de R-D et/ou des liens avec la base de recherche, les établissements d'enseignement et de formation, les associations professionnelles, les ministères, les transports et les communications, une série d'organisations de soutien aux entreprises, les institutions financières, etc.

H. Réseaux, collaboration et grappes

Les réseaux jouent un rôle essentiel dans la transmission du savoir et des informations. En effet, les marchés ne sont guère efficaces dans ce domaine. La collaboration permet aux entreprises de partager les risques et les coûts et leur donne accès à des capacités complémentaires qu'elles ne possèdent pas elles-mêmes. Les grappes impliquent à la fois des relations de marché et la constitution de réseaux, nécessitent généralement la proximité géographique et donnent aux entreprises l'avantage d'économies d'échelle et de champ d'activité externes, notamment en ce qui concerne les externalités.

G. Efficacité des mécanismes du marché

Il s'agit ici de la mesure dans laquelle l'interaction des entreprises et d'autres facteurs sur le marché sont propices à l'innovation. La concurrence, en particulier, fournit une stimulation importante à l'innovation, tandis que l'innovation est une des manières les plus importantes par lesquelles les entreprises se concurrencent. De même, bien que la suppression des obstacles à l'accès aux marchés soit propice à l'innovation, les entreprises tenteront d'innover selon des modalités qui compliqueront la tâche des autres entreprises qui voudront rivaliser avec elles. Même si elles y parviennent, l'avantage ne sera que temporaire ou prendra fin lorsque les droits de propriété intellectuelle viendront à échéance. L'innovation radicale est un des moyens qui permettent de surmonter les obstacles à l'accès existants et de réduire l'avantage concurrentiel des entreprises en place. La capacité d'une économie à susciter la création de nouvelles entreprises et à encourager par la suite leur croissance et leur développement joue un rôle essentiel dans l'innovation et la capacité à s'adapter aux fluctuations de la situation économique et à tirer parti de nouvelles opportunités. Ces processus seront affectés par la politique de la concurrence, les autres politiques réglementaires, les normes et le régime des DPI ainsi que par la politique des échanges.

J. Environnement de l'entreprise

Cet aspect concerne les conditions de base, dont la stabilité macro-économique/politique/sociale, le cadre juridique, l'acceptation publique, etc. Il devrait comprendre également les aspects non spécifiques de la culture d'entreprise, les pratiques et les règles non écrites qui régissent la conduite

des affaires. La gouvernance de l'entreprise, qui peut avoir des incidences non négligeables sur la stratégie des entreprises et les attitudes vis-à-vis de l'innovation, est également inclus ici.

2.3.2 Description des cas

Dans l'étude, vingt-trois cas ont été analysés conformément au schéma de la figure 2.3. Présentés dans le tableau 2.1, certains sont des succès, d'autres des échecs et d'autres enfin sont à mi-chemin entre succès et échec.

Chaque rapport au niveau national est disponible sur le site web de l'AEN associé au rapport correspondant www.nea.fr/download/innovation.

Tableau 2.1 Description des cas

N°	Pays	Système cible	Type de système ¹	Finalité ²	Type de travaux ³
1	Belgique	Développement de combustible oxyde mixte (MOX)	R	N, E	RD, D, DI, DG
2	Belgique	MYRRHA	R	N, E	RD
3	Canada	Développement du réacteur CANDU avancé (ACR)	E	N, E	RD
4	Canada	Développement du système énergétique SLOWPOKE	E	N	RD, D
5	Espagne	Projet DON (deutérium, liquide organique, uranium naturel)	R	N	RD
6	Espagne	Développement de robots mobiles pour la maintenance et l'inspection d'installations nucléaires et radioactives	E	N	RD, D
7	États-Unis	Développement du réacteur surgénérateur de Clinch River	R	N	RD
8	États-Unis	Programme des réacteurs à eau ordinaire avancés (ALWR) et programme NP2010	E	N, E	RD, DI
9	EURATOM	Développement de l'EFR (European Fast Reactor)	R	N, E	RD
10	EURATOM	Tableaux d'identification et de catégorisation des phénomènes (PIRT) dans le cadre du projet EURSAFE	E	ND	DI, DG
11	Finlande	Développement d'APROS (Simulateur avancé de procédé)	E	N	RD, D, DI
12	Finlande	Développement de NURES (Système d'élimination de nucléides)	E	N	RD, D, DI
13	France	Développement de réacteurs à neutrons rapides (RNR) (Phénix & Superphénix)	R	ND	RD, D, DI
14	France	Développement de l'EPR (Réacteur à eau pressurisée européen)	E	N, E	RD, DI, DG
15	France	Développement de combustible oxyde mixte (MOX)	R	N, E	RD, D, DI, DG
16	Japon	Développement du réacteur thermique avancé (ATR)	R	ND	RD, D, DI
17	Japon	Amélioration et standardisation des réacteurs à eau ordinaire (REO)	E	N	DI, DG
18	République de Corée	Développement et déploiement du réacteur nucléaire standard de la République de Corée (KSNP)	RP	N	RD, DI, DG
19	République de Corée	Développement de combustible CANFLEX (CANDU FLEXible)	E	N	RD, DI
20	République tchèque	Développement du HWGCR (Réacteur modéré à l'eau lourde et refroidi au gaz)	RP	N	DI
21	République tchèque	Déploiement de centrales nucléaires de type VVER-1000	E	N	D, DI
22	Suisse	Développement du réacteur de chauffage suisse (SHR)	RP	N, E	RD
23	Suisse	Développement d'un combustible à taux de combustion élevé	E	N	RD, D, DI, DG

1. E : évolutif ; RP : révolutionnaire au sein du pays ; R : révolutionnaire.

2. I : utilisation interne ; N : utilisation au niveau national ; E : exportation.

3. RD : R-D ; D : Démonstration ; DI : Déploiement initial ; DG : Diffusion généralisée.

3. BESOINS D'INNOVATION DANS LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE

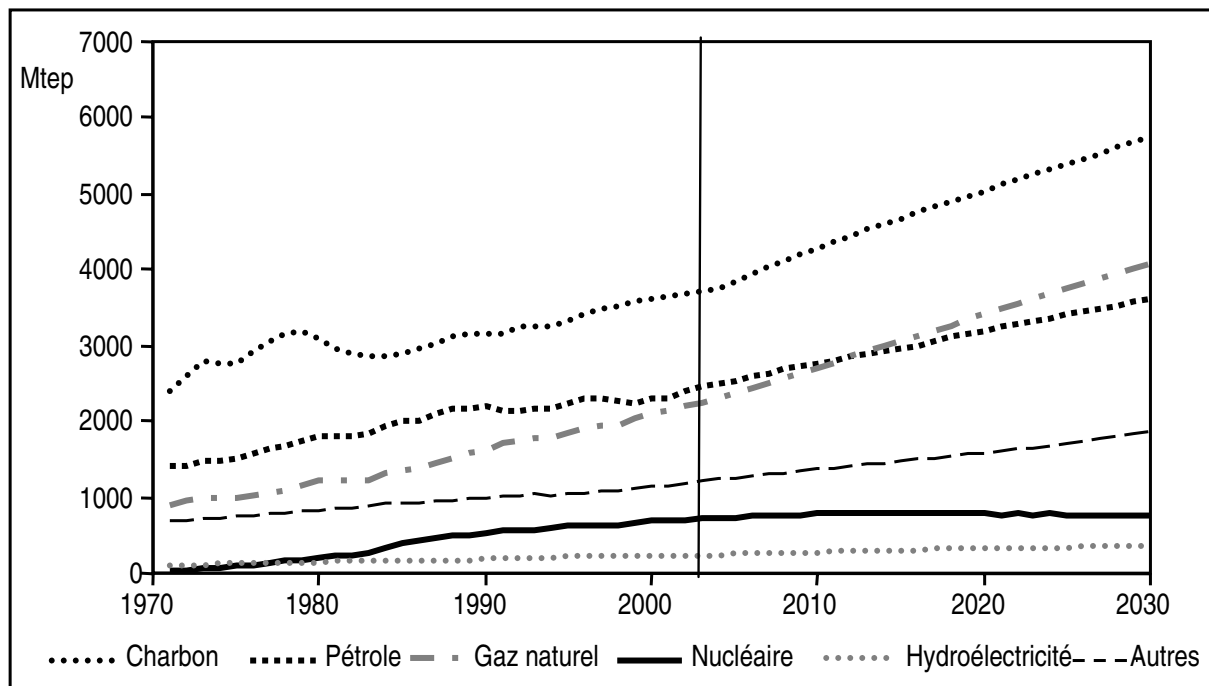
3.1 Perspectives énergétiques à l'échelon mondial

3.1.1 Demande énergétique

Dans les Perspectives énergétiques mondiales 2004 de l'AIE (WEO, 2004) [11], l'hypothèse adoptée pour le taux de la croissance économique mondiale – élément moteur de la demande énergétique – est 3.2 % par an en moyenne sur la période 2002-2030, soit légèrement moins que dans les trois décennies précédentes. Avec les économies des pays en développement (PED) qui parviennent à maturité et le ralentissement de la croissance démographique, ce taux est supposé chuter de 3.7 % entre 2002 et 2010 à 2.7 % entre 2020 et 2030. On fait l'hypothèse que les économies de la Chine, de l'Inde et d'autres pays d'Asie continuent de croître très rapidement.

Le WEO 2004 dresse un tableau préoccupant de l'évolution probable du système énergétique mondial d'ici 2030. Si les gouvernements s'en tiennent aux politiques en vigueur à la mi-2004, les besoins énergétiques dans le monde dépasseront de presque 60 % leur niveau actuel en 2030. Les combustibles fossiles demeureront prépondérants dans le bilan énergétique mondial et couvriront la majeure partie de l'accroissement de la consommation totale d'énergie, comme indiqué figure 3.1. Selon ce même rapport, les parts revenant au nucléaire et aux énergies renouvelables resteront faibles.

Figure 3.1 Demande énergétique mondiale suivant les principaux combustibles



Source : AIE (2004), *World Energy Outlook 2004*, (disponible en anglais et en japonais), OCDE, Paris.

Toujours selon les résultats présentés dans le WEO 2004, la demande mondiale en électricité doublerait d'ici à 2030, un doublement qui serait surtout imputable aux pays en développement. En 2030, la production d'électricité représenterait près de la moitié de la consommation mondiale de gaz naturel. Elle devrait avoir aussi absorbé plus de 60 % de l'investissement total dans les infrastructures énergétiques d'ici cette date. À l'échelon mondial, le secteur de l'électricité devrait construire quelque 4 800 GW de puissance installée pour répondre à l'accroissement prévu de la demande d'électricité, ainsi que pour remplacer les infrastructures obsolètes. Au total, l'investissement nécessaire avoisinerait USD 10 000 milliards (10^{12}), dont plus de USD 5 000 milliards dans les seuls pays en développement.

3.1.2 Approvisionnement énergétique et développement durable

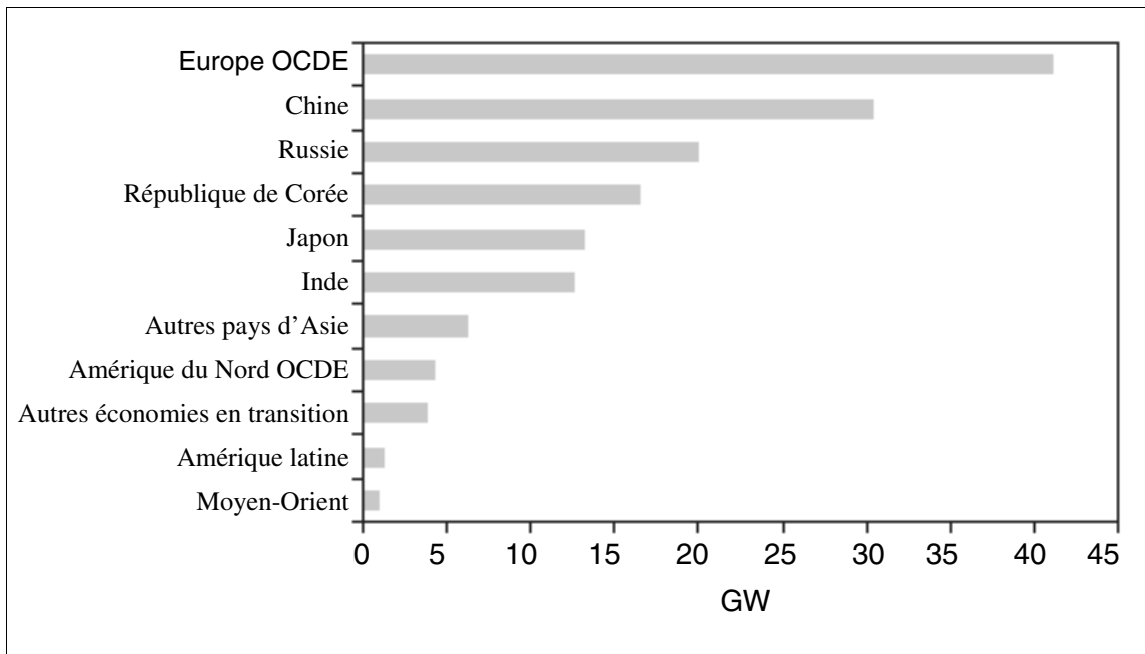
La vulnérabilité mondiale à des perturbations des approvisionnements s'accroîtra avec l'expansion des échanges internationaux. Les émissions de dioxyde de carbone, qui déstabilisent le climat, continueront de croître et compromettront la durabilité du système énergétique actuel. Il faudra financer une pléthore de nouvelles infrastructures énergétiques. Et pourtant, beaucoup parmi les plus démunis de la population mondiale seront encore privés de services énergétiques modernes. Ces défis appellent une action urgente et décisive des gouvernements de tous les pays du monde.

L'analyse du WEO 2004 met en évidence l'importance des percées technologiques, modifiant radicalement les modes de production et de consommation de l'énergie, pour parvenir à un système énergétique véritablement durable. Les actions des pouvoirs publics envisagées dans le scénario alternatif de cette étude pourraient ralentir la croissance des émissions de CO₂, mais ne les réduiraient pas de façon notable, avec les seules technologies existantes. Les technologies de capture et de stockage du carbone, qui ne sont prises en compte, ni dans le scénario de référence, ni dans le scénario alternatif, laissent entrevoir la perspective attrayante d'utilisation des combustibles fossiles sans rejet de carbone. Les conceptions avancées de réacteurs nucléaires ou les technologies innovantes dans le domaine des énergies renouvelables pourraient nous affranchir un jour de la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. La vitesse de développement et de diffusion de ces technologies est essentielle pour que le système énergétique mondial soit à terme soutenable, des points de vue économique, social et environnemental. Les consommateurs devront toutefois accepter de payer le vrai prix de l'énergie – incluant les coûts environnementaux – avant que ces technologies deviennent concurrentielles. Les gouvernements doivent prendre des décisions dès maintenant afin d'accélérer ce processus.

3.1.3 Puissance électronucléaire mondiale

Selon le WEO 2004, la puissance nucléaire installée dans le monde augmenterait légèrement, mais la part du nucléaire dans la production totale d'électricité diminuerait. La capacité des nouvelles centrales installées (voir figure 3.2) serait presque entièrement compensée par le retrait des centrales plus anciennes. Les trois quarts de la puissance installée dans l'Europe OCDE devraient définitivement être arrêtés à l'horizon 2030, parce que les réacteurs auront atteint le terme de leur durée de vie utile ou que les gouvernements auront programmé leur abandon. La production électronucléaire s'accroîtrait dans un certain nombre de pays d'Asie, notamment en Chine, en République de Corée, en Inde et au Japon.

Figure 3.2 Augmentation de la puissance nucléaire installée par région, 2003-2030



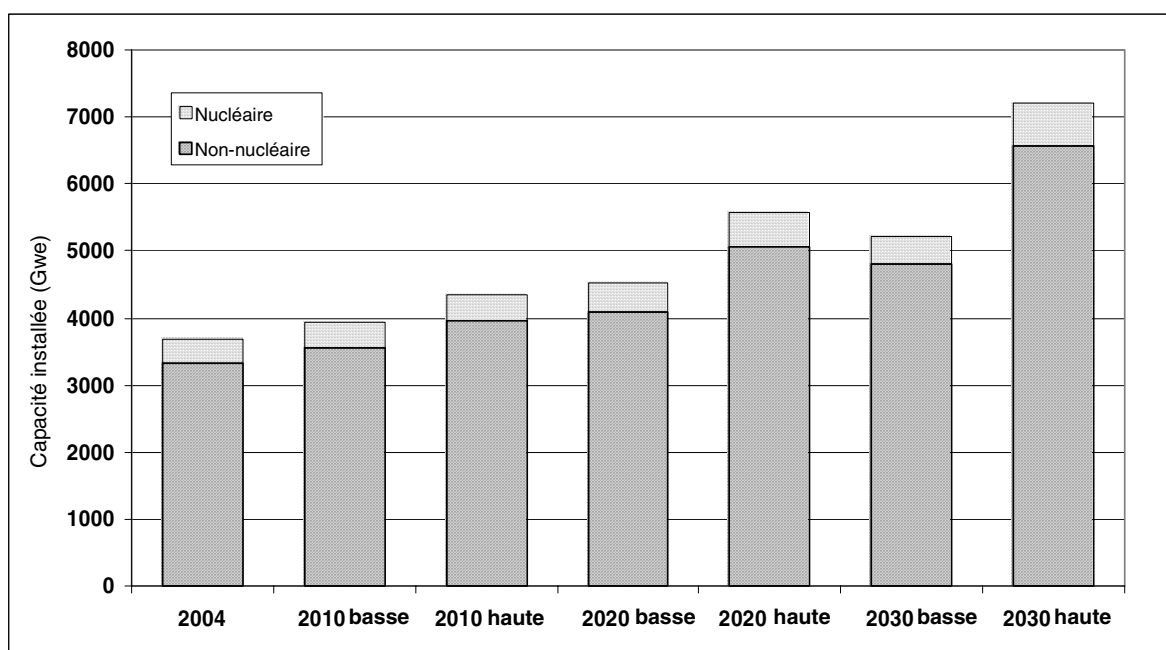
Source : AIE (2004), *World Energy Outlook 2004*, (disponible en anglais et en japonais), OCDE, Paris.

Comme on peut le voir sur la figure 3.3, les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) donnent un tableau similaire de la situation. Dans l'hypothèse basse, les obstacles actuels à l'extension de l'électronucléaire devraient persister dans la plupart des pays au cours des trois prochaines décennies :

- faible taux de croissance de l'économie et de la demande en électricité dans les pays de l'OCDE ;
- opposition publique au nucléaire, conduisant les pouvoirs publics à prendre des décisions défavorables à cette option, malgré sa compétitivité et sa possible contribution à la réduction des impacts de la production d'électricité sur l'environnement ;
- problèmes institutionnels et financiers empêchant la mise en œuvre des programmes nucléaires préalablement planifiés, notamment dans les économies en transition et les PED ;
- dispositifs inappropriés pour le transfert de technologie nucléaire et le financement des projets nucléaires dans les PED.

L'hypothèse haute correspond à une reprise modeste du développement de l'énergie électronucléaire, laquelle pourrait résulter en particulier d'une évaluation comparative plus complète des différentes options possibles pour la production d'électricité et intégrant les aspects économiques, sociaux, sanitaires et environnementaux. Ces estimations s'appuient sur une étude des programmes électronucléaires nationaux évaluant leur faisabilité technique et économique. Elles supposent que certaines mesures politiques seront prises pour faciliter la mise en œuvre de ces programmes, comme le renforcement de la coopération internationale, l'amélioration de l'adaptation et du transfert technologiques, ainsi que l'instauration de mécanismes de financement innovants. Ces estimations prennent enfin en compte les préoccupations mondiales concernant les changements climatiques provoqués par la concentration croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ainsi que la ratification du protocole de Kyoto.

Figure 3.3 Capacité de production d'énergie électrique estimée et part de l'énergie nucléaire



Source : AIEA (2005), *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, Vienne.

Dans une étude [13], l'AIEA et l'IIASA étudient le potentiel de l'énergie nucléaire à partir des scénarios SRES (Rapports spéciaux des scénarios d'émission) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [14]. Dans les SRES, quatre canevas narratifs (représentant chacun une évolution différente au plan démographique, social, économique, technologique et environnemental) et pour chaque canevas différentes quantifications ou scénarios ont été élaborés. Il en résulte 40 scénarios pour la période d'ici à 2100, groupés en quatre « familles » (A1, A2, B1 et B2). Dans les scénarios A2 et B2 à évolution technologique lente, le créneau commercial de l'énergie nucléaire demeure la production d'électricité. Dans les scénarios A1 et B1 à évolution technologique rapide, elle est sérieusement concurrencée par la production d'hydrogène. De 2030 à 2050, l'accroissement annuel moyen de la capacité mondiale de production d'hydrogène dans le scénario B1 est plus de deux fois supérieur à l'accroissement de capacité pour la production d'électricité. L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables se disputent ce marché en expansion.

L'étude AIEA/IIASA se démarque de l'hypothèse selon laquelle les résultats des SRES doivent être interprétés comme des contraintes strictes pour l'industrie nucléaire. Elle les considère plutôt comme des indications d'opportunités et demande à quel rythme le secteur du nucléaire doit réduire ses coûts et améliorer sa compétitivité pour conquérir des futures parts de marché sensiblement plus importantes que celles basées sur les estimations de coût des auteurs des SRES. L'étude présente pour chacun des quatre scénarios SRES une variante « de progression marquée du nucléaire », en partant de l'hypothèse que la technologie nucléaire opère des incursions suffisantes dans les segments coûteux des parts de marchés de ses principaux rivaux. L'étude parvient à la conclusion que, avec des mesures techniques et économiques appropriées, le potentiel du nucléaire pour les applications électriques ou thermiques est, selon les canevas, de 2 à 7 fois supérieur à celui pris comme hypothèse dans les SRES.

Dans l'ensemble, il ressort clairement que l'énergie nucléaire représente l'une des options susceptibles de répondre de manière « durable » aux futurs besoins énergétiques croissants de la planète. Ceci souligne la nécessité de l'innovation dans le nucléaire.

3.2 Contraintes de durabilité

3.2.1 Concept de développement durable

Le concept de développement durable a été reconnu en 1987 avec la publication du rapport « Notre avenir à tous » par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Commission Brundtland). Le *développement durable* est défini dans ce rapport comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins ». Dans une large acception, le développement durable prend en considération l'équité à l'échelle nationale et internationale, mais aussi entre les générations, et fait la synthèse entre la croissance économique, la protection de l'environnement et le bien-être social. L'un des défis majeurs des politiques de développement durable consiste à influencer sur ces trois dimensions de manière équilibrée, en mettant à profit leurs interactions et en opérant les arbitrages appropriés à chaque fois que cela s'avère nécessaire.

Le développement durable a été au cœur du Sommet de la Terre, qui s'est tenu en juin 1992 à Rio de Janeiro. Le chapitre 40 (L'information pour la prise de décisions) de l'Agenda 21 demandait aux pays, et aux organisations gouvernementales et non-gouvernementales, à l'échelon international, de définir la notion d'indicateurs du développement durable, afin de pouvoir les identifier.

3.2.2 Indicateurs de durabilité

Le projet triennal horizontal de l'OCDE sur le développement durable a été lancé en avril 1998 par les ministres de l'OCDE, qui ont demandé à l'Organisation de définir sa stratégie dans les domaines du changement climatique, de la technologie, des indicateurs de durabilité et de l'incidence des subventions sur l'environnement. Ce projet visait à rendre le concept de développement durable applicable dans les politiques gouvernementales et à aboutir à l'élaboration de nombreux produits pour la réunion du Conseil de l'OCDE au niveau ministériel de 2001, notamment une série de rapports d'orientation, fruits des travaux de diverses directions et organes autonomes de l'OCDE. Le cadre du développement durable mentionné devait permettre, en intégrant les facteurs économiques, sociaux et environnementaux, de répondre aux préoccupations de la société au coût le plus faible et de faire ressortir les liens et les arbitrages entre ces différents domaines. Le tableau 3.1 donne la liste des indicateurs environnementaux retenus par l'OCDE.

L'énergie est liée à chacune des trois dimensions du développement durable. Les services d'approvisionnement en énergie sont essentiels au développement économique et social, ainsi qu'à une meilleure qualité de vie. Alors que la demande énergétique continue d'augmenter, dans le même temps, les activités actuelles de production et de consommation d'énergie sont responsables de dégradations étendues de l'environnement à tous les échelons – local, régional et mondial. De grandes disparités existent entre les pays concernant les quantités d'énergie consommées ; un tiers de la population mondiale souffre de ne pas avoir l'accès à l'électricité. Si l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables de la planète est une préoccupation mondiale à long terme, l'approvisionnement régulier et continu en énergie importée est une préoccupation à court terme pour les pays manquant de ressources en combustibles fossiles. Aussi, il est vital de fournir une énergie appropriée à des coûts abordables, dans des conditions sûres et respectueuses de l'environnement, en harmonie avec les besoins de développement économique et social. Le fait que le secteur de l'énergie et les questions liées à l'énergie aient fait l'objet d'une attention toute particulière dans les programmes relatifs à la poursuite de la mise en œuvre d'Action 21 suffit à montrer combien ces éléments sont importants.

Table 3.1 Liste des principaux indicateurs environnementaux pour l'OCDE

Problèmes de pollution		Ressources et actifs naturels	
Changement climatique	◆ Intensité des émissions de CO ₂	Ressources en eau douce	◆ Intensité d'utilisation de l'eau
Appauvrissement de la couche d'ozone	◆ Index de consommation apparente de substances menaçant la couche d'ozone	Ressources forestières	◆ Intensité d'utilisation des forêts
Qualité de l'air	◆ Intensité des émissions de SO _x et NO _x	Ressources halieutiques	◆ Intensité d'utilisation des ressources de pêche
Production de déchets	◆ Intensités de production d'ordures ménagères	Ressources énergétiques	◆ Intensité d'utilisation de l'énergie
Qualité de l'eau douce	◆ Taux de raccordement au réseau d'assainissement	Biodiversité	◆ Espèces menacées

Source : OCDE (2001), *OECD Environmental Indicators Towards Sustainable Development*, (disponible en anglais uniquement), Paris.

L'AEN a apporté sa contribution au projet de l'OCDE en fournissant des informations sur l'énergie nucléaire pertinentes pour l'élaboration de politiques de développement durable. Dans le cadre du rapport publié par l'AEN à cette occasion [16], sont examinées les caractéristiques spécifiques de l'énergie nucléaire au regard des dimensions économiques, environnementales et sociales. Le rapport fournit des données et des analyses sur l'option nucléaire, que les décideurs pourront utiliser, conjointement avec des informations sur d'autres options, pour alimenter leur réflexion en fonction de leur contexte spécifique et de leurs priorités. Divers indicateurs pertinents pour l'énergie nucléaire s'inscrivant dans les dimensions économiques, sociales et environnementales y sont identifiés ; le tableau 3.2 en donne des exemples.

Table 3.2 Indicateurs du développement durable (liste indicative applicable à l'énergie nucléaire)

Indicateurs économiques	Indicateurs sociaux	Indicateurs environnementaux
Coût du capital (\$/kWe) Coût marginal (\$/kWh)	Dose à la population (Sv/kWh) Emploi (homme/kWh) Enseignement (nombre de cursus universitaires)	Volume de déchets solides (m ³ /kWh) Activité des déchets solides (Bq/kWh) Consommation de combustible (tU/kWh) Activité des effluents liquides et gazeux (Bq/kWh)

Source : AEN (2000), *Énergie nucléaire dans une perspective de développement durable*, OCDE, Paris.

Le rapport a par ailleurs analysé les caractéristiques suivantes de l'énergie nucléaire :

- *Dimension économique* – Concurrence, subventions, coûts et avantages externes.
- *Dimension environnementale* – Gestion des ressources naturelles, radioprotection, sûreté, responsabilité de tiers, gestion des déchets radioactifs.

- *Dimension sociale* – Ressources humaines, cadre institutionnel, non-prolifération, participation publique et aspects politiques, coopération internationale.

De nature descriptive et assez générale, les informations fournies sont rarement spécifiques ou qualitatives (hormis les chiffres sur les coûts de production et les ressources d'uranium) ; la possibilité de futures évolutions technologiques n'a pas été abordée dans le détail.

En résumé, les travaux à l'échelon national et international sur les indicateurs du développement durable se poursuivent. Les initiatives ont été suscitées par des préoccupations émises à l'échelon international concernant « la planète Terre » et par des demandes de décideurs chargés de mettre en œuvre, au niveau national, le concept de développement durable. Les indicateurs sont donc d'une nécessité absolue et d'une extrême importance. Même si les trois dimensions du développement durable sont prises en compte, en principe, les indicateurs environnementaux, complétés par certains facteurs économiques, demeurent mieux appréhendés que les indicateurs sociaux.

3.2.3 Durabilité et technologie électronucléaire

En l'état actuel, la technologie électronucléaire affiche un niveau élevé de conformité aux critères de durabilité et se classe excellemment par rapport aux autres alternatives énergétiques. Nombre d'études ([17], par exemple) ont étudié les performances de différentes options énergétiques en matière de durabilité en se servant de l'analyse du cycle de vie et en prenant en compte les technologies les plus récentes. Elles montrent que la production d'énergie nucléaire figure parmi les meilleures alternatives, à la fois au regard d'indicateurs spécifiques ou d'indicateurs agrégés, comme les coûts totaux, externalités comprises.

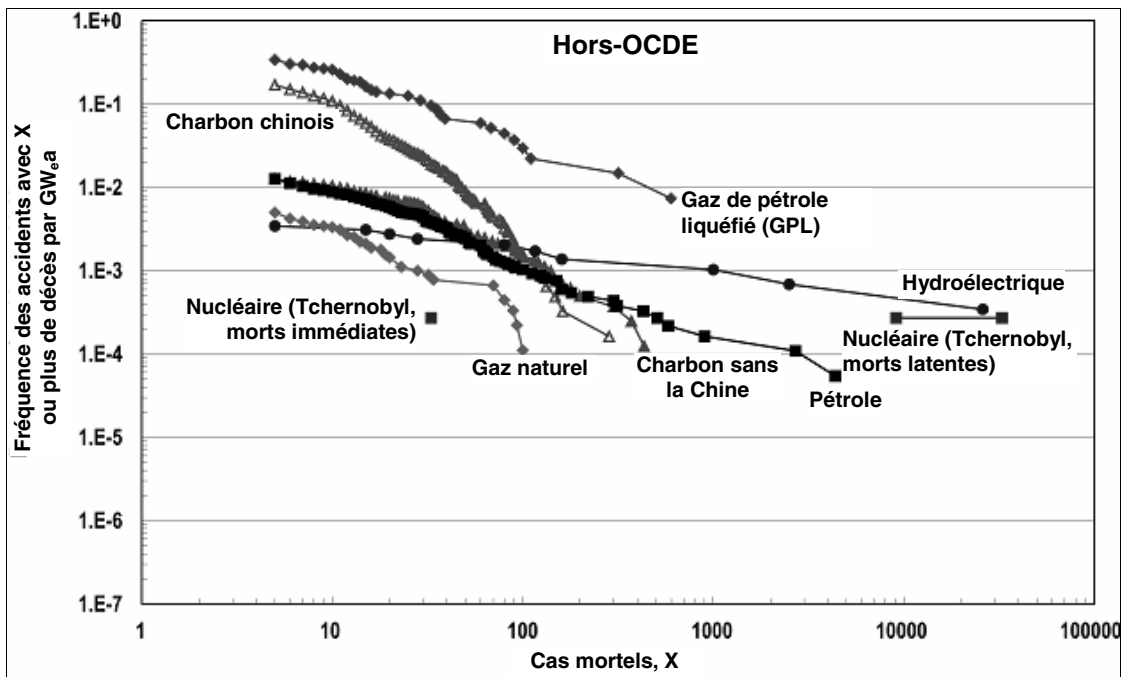
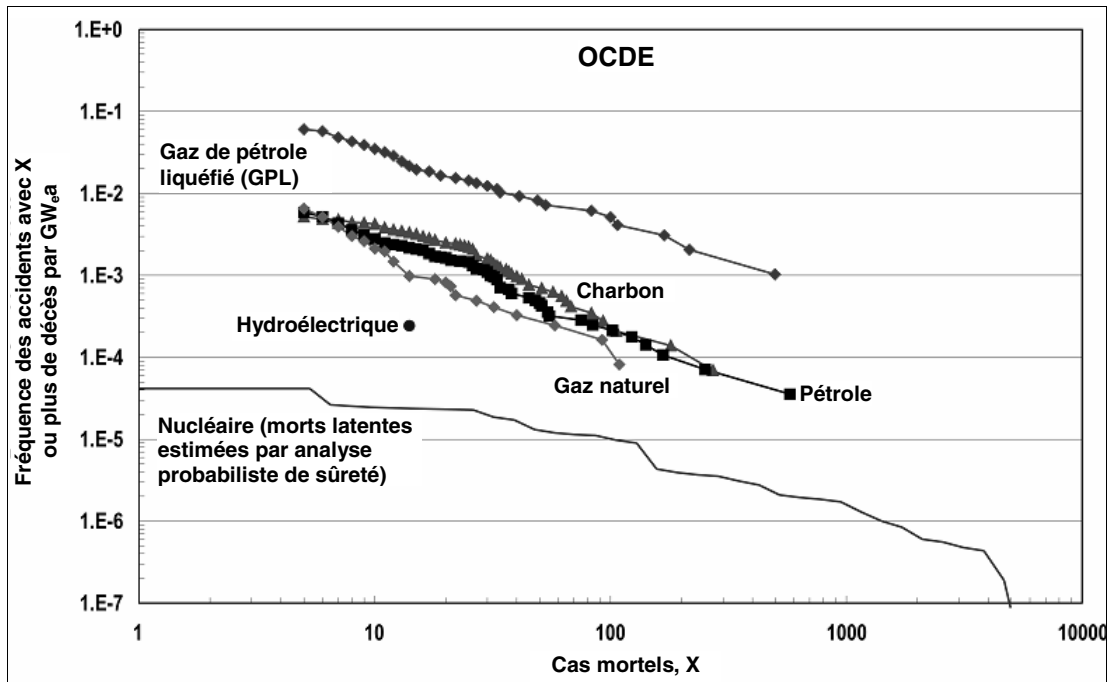
La performance de l'énergie nucléaire en termes de sûreté (définie comme le risque d'accidents mortels suite à un accident grave [18]) est excellente (voir figure 3.4).

Cette performance positive de l'énergie nucléaire n'est toutefois pas perçue comme telle par certains décideurs politiques et une partie du public. Les avis négatifs sont liés aux problèmes suivants :

- Sûreté (possibilité d'événements catastrophiques avec un nombre élevé de morts latentes et une contamination terrestre prolongée) et craintes du public réduisant son acceptation de l'énergie nucléaire.
- Gestion des déchets nucléaires (sûreté, irrécupérabilité, fardeau pour les générations futures, perte d'informations).
- Ressources (ressources d'uranium connues et estimées comparées à la demande pour une puissance électronucléaire en expansion sur le long terme).
- Risques de prolifération et d'attaques terroristes.

Pour résoudre ces problèmes, qui sont autant de défis pour les futurs systèmes d'énergie nucléaire, il faut à la fois procéder à des développements technologiques ciblés et s'efforcer d'offrir en permanence aux responsables politiques et au public des informations transparentes, objectives et impartiales.

Figure 3.4 Accidents graves du secteur de production d'électricité, pays de l'OCDE et hors OCDE, 1969-96



Source : Burgherr, P., et al. (2004), « External costs from major accidents in non-nuclear energy chains », Report prepared by PSI for European Commission within Project NewExt, in : R. Friedrich et al., *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies* (2004).

La durabilité dans son acception large, qui englobe les aspects environnementaux, économiques et sociétaux, figurait naturellement en tête des objectifs qui ont été imposés aux futurs systèmes d'énergie nucléaire au début de l'initiative « Génération IV » et utilisés par la suite pour élaborer les critères et les indicateurs servant à sélectionner les projets prometteurs [19] :

Durabilité-1 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV et leurs cycles de combustible assureront une production d'énergie durable, répondant aux objectifs de pureté de l'air, favorisant la disponibilité des systèmes à long terme et une utilisation efficace du combustible pour la production d'énergie à l'échelon mondial.

Durabilité-2 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV minimiseront et géreront leurs déchets nucléaires et réduiront notablement à l'avenir les contraintes administratives à long terme, permettant ainsi d'améliorer la protection de la santé publique et de l'environnement.

Économie-1 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV présenteront un net avantage en termes de coût total de production moyen sur leur durée de vie par rapport aux autres sources d'énergie.

Économie-2 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV présenteront un risque financier comparable aux autres projets énergétiques.

Sûreté et fiabilité-1 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV fonctionneront de manière excellente au plan de la sûreté et de la fiabilité.

Sûreté et fiabilité-2 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV n'auront qu'une faible probabilité de voir leurs réacteurs endommagés et dans des proportions minimales.

Sûreté et fiabilité-3 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV élimineront le besoin d'intervention d'urgence hors site.

Résistance à la prolifération et protection physique-1 : les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV offriront encore plus la garantie qu'ils constituent une voie très inintéressante et des plus dissuasives pour le détournement ou le vol de matériaux utilisables dans des armes, et ils assureront une plus grande protection physique contre des actions terroristes.

3.3 Rôle de l'innovation en matière de technologie nucléaire

Les éléments moteurs du développement technologique peuvent prendre diverses formes : objectifs de la politique de recherche (définis par les pouvoirs publics) ; maturité commerciale et pénétration sur le marché (décidées par l'industrie), maturité opérationnelle et domination du marché (du ressort des autorités de sûreté et de l'industrie) ; et développements répondant à de nouveaux objectifs pour les besoins futurs (initiés par l'industrie et les pouvoirs publics). Ce dernier élément est intimement couplé à l'innovation. Rien d'étonnant donc à ce que le premier des quatre objectifs stratégiques de l'initiative Génération IV indique que « les objectifs technologiques à remplir par les systèmes de génération IV doivent être ambitieux et stimuler l'innovation ».

3.3.1 Domaines se prêtant à des solutions innovantes

Dans le cadre d'un déploiement plus important de l'énergie nucléaire à l'avenir, des solutions innovantes sont à l'étude dans les domaines énumérés ci-dessous.

Préservation des ressources et minimisation des déchets

Si l'on veut d'une part, minimiser le volume des déchets et réduire le temps de confinement nécessaire, et d'autre part, mieux exploiter le contenu énergétique des matériaux fissiles, il convient de recourir à des cycles de combustible avancés, et notamment à des réacteurs thermiques avancés et des réacteurs à neutrons rapides, en combinaison avec un retraitement et un recyclage multiple des actinides. De nombreux systèmes de ce type sont à l'étude, en particulier dans le cadre de l'initiative Génération IV. Le rôle de la science est en l'occurrence de combler les retards technologiques existants en utilisant les solutions les plus avancées, tout en conservant un niveau élevé de sûreté et de faibles coûts.

Élimination effective des catastrophes hors site

Les futurs systèmes d'énergie nucléaire ne doivent plus constituer une menace de catastrophes. Les conséquences de tout accident, même le plus grave, doivent être cantonnées à la centrale et ne pas affecter l'environnement. Des premiers concepts ont été mis au point pour les systèmes thermiques (réacteurs refroidis à eau ou au gaz), à l'aide de systèmes de sûreté passive et de dispositifs à sûreté intrinsèque. Le défi consiste à conserver ces caractéristiques sur les systèmes de la prochaine génération à spectre neutronique rapide et au comportement différent en termes de sûreté.

Maintien de la compétitivité économique, réduction de la charge financière

Les futurs systèmes d'énergie nucléaire doivent conserver des coûts d'exploitation au faible niveau actuel et, en outre, permettre de réduire l'investissement requis et les longs délais de mise en œuvre. Les mesures techniques appropriées à cet effet résident dans la simplification, la standardisation, la préfabrication et la modularisation. Une fois encore, le défi consistera à combiner sûreté élevée, optimisation des ressources et minimisation des déchets, grâce à des concepts simples et peu coûteux.

Pénétration de nouveaux secteurs énergétiques

On devrait observer un très fort déploiement du nucléaire essentiellement sur le marché hors électricité. Le principal problème étant d'obtenir les températures extrêmement élevées requises pour les applications industrielles, il faut mettre au point des matériaux capables de résister à ces températures et aux fluences neutroniques, et éventuellement, à des caloporteurs hautement corrosifs.

Élimination de l'emploi abusif des matières nucléaires

Diverses mesures techniques, notamment dans le domaine de la fabrication de combustible (combustibles de type ROX) peuvent considérablement réduire le risque d'emploi abusif de matériaux nucléaires sensibles. De nouvelles technologies de contrôle exploitant pleinement les avancées des technologies de l'information (TI) et de la communication peuvent en outre contribuer à renforcer les mesures administratives existantes.

3.3.2 Partage des innovations avec d'autres secteurs

Dans le traitement des problèmes précédemment évoqués, les développements technologiques nucléaires peuvent et doivent progresser de pair avec ceux d'autres secteurs, les échanges intervenant

dans les deux sens. Cela est tout particulièrement le cas pour les matériaux, les procédés, l'automatisation et la simulation, ainsi que la gestion des risques.

Matériaux

Les matériaux à haute température sont recherchés dans les applications spatiales et le développement de réacteurs thermonucléaires. Pour savoir s'ils conviennent aux applications liées à la fission nucléaire, ils doivent être testés dans des conditions qui lui sont spécifiques : fluence, pression, charges transitoires, interaction avec les caloporteurs, tels l'hélium, le plomb, l'eau supercritique, etc.

Procédés

On peut mettre à profit les progrès de l'industrie chimique (création de nouveaux solvants) pour élaborer des procédés de séparation à haut rendement destinés au retraitement du combustible. De nouveaux procédés pyro-métallurgiques seraient souhaitables pour le retraitement par voie sèche. Les nouveaux procédés chimiques pourraient être bénéfiques dans la production de graphite de très grande pureté et de nouvelles matrices céramiques pour des combustibles résistants à la prolifération.

Automatisation et simulation numérique

Les avancées dans les TI peuvent être utilisées pour de nouvelles techniques de télé-fabrication et de télé-manipulation servant à la fabrication et au retraitement du combustible, mais aussi pour les activités d'inspection et de réparation dans les centrales. D'autre part, on peut employer des ordinateurs superpuissants pour des simulations personnalisées de phénomènes complexes (séquences accidentelles, par exemple) en mode temps réel ou supérieur au temps réel, et permettre ainsi de réduire les incertitudes lors de la conception d'installations nucléaires.

Gestion des risques

Les méthodologies et pratiques de gestion des risques dans le secteur nucléaire peuvent être appliquées dans d'autres secteurs, notamment pour la prévention des accidents (PSA niveau 1), la réduction des conséquences d'accidents graves (PSA niveau 2), l'analyse des risques pour l'environnement (PSA niveau 3), la gestion des urgences à l'échelon national ou international, et enfin, la communication sur les risques aux décideurs, guides d'opinion et/ou au grand public.

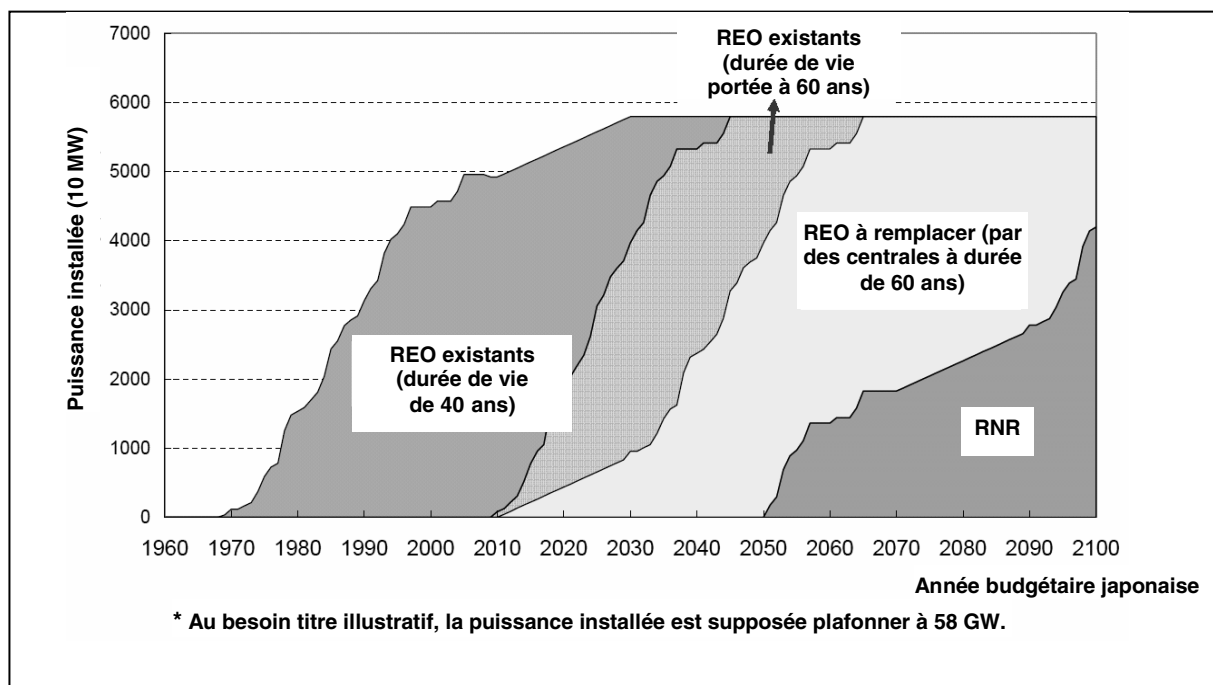
3.3.3 *Préservation du savoir*

La R-D sur des solutions innovantes et leur application sont d'excellents moyens d'instaurer un climat positif, marqué par l'optimisme et la confiance dans le futur, et partant, de motiver les effectifs actuels, d'attirer de jeunes scientifiques et ingénieurs talentueux, et de les retenir dans le secteur nucléaire. Le vieillissement de la génération actuelle de spécialistes et la nécessité de leur renouvellement a une question importante pour le secteur nucléaire ; l'innovation en matière de technologie nucléaire peuvent contribuer à ce renouvellement.

4. EFFORTS D'INNOVATION NUCLÉAIRE À L'ÉCHELON NATIONAL ET INTERNATIONAL

De nombreux pays envisagent de continuer à utiliser l'énergie nucléaire au-delà de la fin du siècle. Des stratégies appropriées pour remplacer les centrales actuelles par de nouvelles installations ont été mises au point. La figure 4.1 présente ces stratégies pour le Japon.

Figure 4.1 Exemple de projections à moyen et long terme de déploiements de centrales nucléaires au Japon



Source : Rapport au niveau national du Japon.

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, les besoins d'innovation dans le secteur de la technologie de l'énergie nucléaire sont et demeureront nombreux. Pour répondre à ces besoins, nombre de pays conduisent des programmes d'innovation nucléaire, que l'on peut classer en quatre catégories :

- Programmes de soutien aux centrales nucléaires et installations du cycle du combustible :
 - ✓ Centrales actuelles (d'ici 5 ans).
 - ✓ Déploiement à moyen terme (dans 5 à 10 ans).
 - ✓ Déploiement à long terme (dans plus de 10 ans).
- Programmes hors production d'électricité.

L'objet de ce chapitre étant de montrer des domaines possibles d'innovation nucléaire par des exemples, les programmes qui y sont décrits ne rendent pas compte de tous les programmes des pays participants, que l'on retrouvera dans les différents rapports nationaux.

4.1 Programmes de soutien aux centrales nucléaires et installations du cycle du combustible existantes

L'innovation ne se borne pas à l'étude des systèmes innovants du futur. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, la technologie nucléaire dispose d'un potentiel d'innovation considérable par rapport aux centrales nucléaires et aux installations du cycle du combustible existantes.

La déréglementation des marchés de l'électricité force les exploitants de centrales nucléaires à lutter pour rester économiquement compétitifs. Parmi les mesures visant à améliorer la compétitivité de l'énergie nucléaire, la valorisation du contenu énergétique du combustible (taux de combustion élevé, assemblages combustibles optimisés) pose un défi côté matériaux (temps d'exposition très longs avec détérioration des matériaux) et côté gestion du combustible (nécessité de calculs plus précis pour le cycle du combustible, optimisation des marges). En outre, les craintes du public concernant l'énergie nucléaire s'étant portées des questions de sûreté à celles des déchets et de la charge qu'ils pourraient représenter pour les générations futures, des évaluations plus précises des dépôts envisageables pour ces déchets sont obligatoires pour gagner sa confiance. Tous ces besoins sont des éléments moteurs d'approches et de solutions technologiques innovantes.

Les programmes relevant de cette catégorie sont généralement réalisés par des organisations de recherche industrielle (ORI), à la demande des compagnies d'électricité. Les programmes de R-D en collaboration et les *Strategic Technical Areas* (programmes conduits dans des domaines techniques stratégiques précisés dans le tableau 4.1) de l'EPRI aux États-Unis en sont des exemples types.

Tableau 4.1 Domaines techniques stratégiques de l'EPRI aux États-Unis

Domaines de programme	Dotation annuelle (USD millions, 2005)
Dégradation/vieillessement des matériaux et chimie	30
Combustible hautes performances/fiabilité du combustible	12
Déchets de haute activité et gestion du combustible utilisé	4
Évaluation non-destructive (END) et caractérisation des matériaux	8
Fiabilité du matériel, performances humaines	14
Modernisation du matériel et des systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande, données sur les centrales	2
Gestion des risques liés aux actifs nucléaires	1
Technologie de gestion des risques de sûreté et applications	8
Déploiement de nouvelles centrales ; avantages pour l'environnement	4
Gestion des déchets de faible activité et des rayonnements	3
TOTAL	86

Source : *Rapport national des États-Unis*.

Ces programmes couvrent une gamme étendue de domaines de R-D : exploitation et maintenance des centrales existantes, gestion de la vie utile des centrales, sûreté des installations nucléaires, gestion des déchets radioactifs, installations du cycle du combustible, etc.

4.1.1 Exploitation et maintenance des centrales

De vastes programmes de recherche sur les combustibles et des technologies destinées à assurer une fiabilité élevée des équipements ont été élaborés pour les centrales actuelles. On peut aujourd'hui

utiliser des combustibles à taux de combustion élevé pour optimiser la longueur du cycle de ces derniers (durée pendant laquelle une centrale peut fonctionner sans s'arrêter). De nouvelles techniques de contrôle et de maintenance des équipements, ainsi que des schémas élaborés de gestion du cœur du réacteur permettent d'avoir des cycles plus longs, des arrêts pour maintenance et rechargement plus courts, et donc des taux de disponibilité élevés. Le taux de disponibilité des centrales nucléaires étant devenu très élevé, les coûts unitaires (ratio coût/énergie produite) sont particulièrement bas.

Dans certains pays, l'accroissement de la capacité installée résulte d'une augmentation de puissance des centrales existantes. C'est une méthode extrêmement rentable de fournir de la capacité supplémentaire. Bon nombre de réacteurs nucléaires de divers pays ont ainsi vu leur capacité de production augmentée de 5 à 10 %, le record étant de 15 % en Finlande.

Les procédures d'exploitation peuvent être optimisées de diverses manières : modernisation de l'équipement d'instrumentation et de contrôle-commande, robots, télémanipulation, gestion du combustible et du rechargement, fiabilité du combustible, fiabilité des équipements, évaluation non destructive, réglementation intégrant le risque, etc.

4.1.2 Gestion de la vie utile des centrales

Une longue durée de vie est l'une des conditions requises pour que l'investissement soit rentable. Aussi observe-t-on à l'échelon mondial une tendance à rallonger la durée de vie opérationnelle des centrales. La plupart des centrales nucléaires avaient à l'origine une durée de vie nominale d'au plus 40 ans, mais des évaluations techniques de nombreuses installations au cours de la dernière décennie ont montré qu'elles pouvaient fonctionner plus longtemps.

Aux États-Unis, en particulier, la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a introduit une procédure standard d'extension de la durée de vie des centrales à 60 ans. Dans ce cadre, les autorisations d'exploitation de 39 réacteurs nucléaires ont été renouvelées depuis l'an 2000. Le renouvellement de l'autorisation est désormais une démarche réglementaire prévisible et ne prêtant plus à controverses. À ce jour, les propriétaires de 78 tranches nucléaires ont décidé de procéder à un renouvellement de leur autorisation et l'on s'attend à ce qu'autres leur emboîtent le pas. Même avec des dépenses d'investissement élevées, l'analyse montre que le renouvellement de l'autorisation d'exploitation d'une centrale existante est de loin la source d'énergie électrique supplémentaire la moins coûteuse.

Dans les réacteurs de puissance, les niveaux d'irradiation sont élevés et les matériaux peuvent subir des dégradations limitant leur durée de vie utile. La gestion de la dégradation et du vieillissement des matériaux est par conséquent l'un des enjeux techniques et économiques majeurs de l'industrie électronucléaire. De plus, pour les centrales approchant de la phase de renouvellement d'autorisation, garantir aux autorités de sûreté que les matériaux en service ont conservé leur fiabilité et leur sûreté donne une dimension supplémentaire à cet enjeu. Les progrès continus au niveau de la compréhension des phénomènes physiques en jeu et des sciences informatiques ont rendu possible le développement d'outils numériques multi-échelles, capables de simuler les effets des irradiations sur les propriétés mécaniques et corrosives des matériaux. Ainsi :

- Dans l'Union européenne, le projet PERFECT (*prediction of irradiation damage effects on reactor components* ou projet pour la prédiction des effets d'irradiation sur les composants des réacteurs nucléaires) s'emploie à mettre au point des outils prédictifs de ce type pour les cuves de réacteur sous irradiation et les structures internes.

- Aux États-Unis, dans le programme de R-D de l'EPRI, le « *materials degradation/ageing strategic solution group* » s'efforce de mieux comprendre et gérer les phénomènes de dégradation/vieillesse des matériaux intervenant dans les principaux composants métalliques des centrales nucléaires.

4.1.3 Sûreté des installations nucléaires

Même si la sûreté des installations nucléaires a constamment été améliorée au fil des ans, il demeure nécessaire de mieux comprendre les interactions complexes intervenant lors d'un accident grave. De nets progrès ont été accomplis dans le domaine de la recherche concernant la gestion de tels accidents dans l'industrie nucléaire. Par exemple :

- Dans l'Union européenne, 49 organismes au total se sont rassemblés au sein du réseau SARNET (*severe accident research network of excellence* ou réseau d'excellence européen sur les accidents graves) pour mettre en commun leurs capacités de recherche, afin de résoudre les incertitudes et les problèmes de sûreté majeurs qui demeurent concernant les accidents graves.
- La France poursuit plusieurs programmes d'expérimentation et de modélisation, notamment les essais VULCANO sur l'interaction corium-béton et les essais KROTOS sur l'interaction corium-eau ; elle participe en outre au programme international de recherche dans le réacteur CABRI sur les accidents avec insertion de réactivité, ainsi qu'à l'évaluation du terme source des combustibles à taux de combustion élevé, dans le cadre des programmes VERCORS et VERDON.
- En Finlande, Fortum a développé et mis en œuvre une stratégie SAM (*severe accident management* ou gestion des accidents graves) pour permettre de gérer les accidents de fusion du cœur.
- Sous l'égide de l'AEN, plusieurs projets conjoints internationaux (MASCA, MCCI, PKL, SETH, etc.) ont été mis en œuvre en vue d'obtenir des données expérimentales sur les phénomènes intervenant lors d'accidents graves.

4.1.4 Gestion des déchets radioactifs

Les aspects liés à la gestion des déchets de faible activité (DFA) et au démantèlement adéquat des installations nucléaires sont essentiels pour la protection de l'environnement et l'acceptation de l'industrie nucléaire par le public. La R-D peut y contribuer de diverses manières :

- En aidant à informer et apaiser les craintes de l'opinion publique à l'aide de données et d'analyses objectives démontrant que les effluents et les déchets de faible activité présentent un risque minime pour la population.
- En développant de nouvelles technologies spécialisées pour le traitement des DFA et en adaptant les technologies mises au point dans d'autres industries au traitement des DFA des centrales nucléaires.
- En favorisant la sûreté de l'évacuation et du transport des DFA, afin de garantir la pérennité de l'industrie nucléaire.
- En démontrant que les futures centrales à REO avancées peuvent fonctionner avec des rejets « quasi nuls » et stocker les DFA sur site pendant leur durée de vie, ce qui devrait fondamentalement faire disparaître les questions liées aux DFA des discussions concernant les nouvelles centrales.

La mise en place de dépôts de déchets de haute activité est elle aussi essentielle pour la pérennité de l'énergie nucléaire et une condition de base à de nouvelles commandes de centrales dans le monde. Dans le cadre du programme de recherche sur l'évacuation des déchets radioactifs, de nombreux travaux tentent de mieux comprendre les mécanismes importants pour l'évaluation de la sûreté à long terme des dépôts géologiques de déchets. Les mécanismes de base régissant la migration des radionucléides, qui s'échappent d'un dépôt suite à la défaillance des barrières ouvragées, sont actuellement identifiés et étudiés de façon générique. Le comportement des radionucléides est par ailleurs modélisé, de sorte à déterminer la quantité de radioactivité qui parvient dans la biosphère.

Dans ce domaine, les innovations technologiques devraient venir de l'utilisation de techniques d'analyse inédites (lumière synchrotron, par exemple) permettant, d'une part, de mieux comprendre les interactions physicochimiques entre les radionucléides et les minéraux du sol et d'établir des modèles atomistiques de tels phénomènes, et d'autre part, de mettre en place des expériences sur le terrain à grande échelle pour étudier le comportement de quantités importantes de radionucléides dans le sol.

4.1.5 Installations du cycle du combustible

Actuellement, la plupart des usines de retraitement utilisent le procédé PUREX. En France, l'expérience croissante dans ce domaine permet d'améliorer en permanence le fonctionnement des installations, y compris la gestion des effluents, une nette réduction du volume des déchets, une gamme de performances plus étendue du le procédé de vitrification et un éventail plus large de combustibles retraités. Ainsi, les taux de séparation de l'uranium et du plutonium atteignent 99.88 %. Ces excellentes performances des systèmes d'extraction contribuent par ailleurs à la réduction du volume de déchets.

4.2 Programmes de soutien aux centrales et cycles du combustible de moyen terme

4.2.1 Réacteurs de génération III et III+

La plus grande différence entre la plupart des modèles de génération III et ceux de génération II, est l'incorporation de dispositifs de sûreté passive ou intrinsèque qui n'exigent aucune régulation active ni intervention d'un opérateur pour éviter les accidents en cas de dysfonctionnement. Ces dispositifs s'appuient sur la gravité, la convection naturelle, la résistance aux températures élevées et encore bien d'autres phénomènes physiques. Les réacteurs de génération III disposent en outre des fonctions améliorées suivantes :

- Conception standardisée qui permet d'accélérer le processus de délivrance de l'autorisation d'exploitation, et de réduire les coûts en capital et le temps de construction.
- Conception plus simple et plus robuste qui rend les réacteurs plus faciles à exploiter et moins vulnérables aux aléas.
- Disponibilité plus élevée et durée de vie plus longue prévue dès la conception – 60 ans en règle générale.
- Probabilité encore plus réduite d'accidents de fusion du cœur.
- Incidences minimales sur l'environnement en cas d'accident grave.

Comme l'indique le tableau 4.2, plus d'une douzaine de réacteurs des générations III et III+ sont parvenus à divers stades de leur évolution. Certains résultent de développements encore plus évolutifs des modèles REP, REB et CANDU. Les seuls réacteurs de ces générations en exploitation sont les

REP avancés évolutifs de grande taille en service au Japon. Ces développements ont généralement été réalisés par les fournisseurs de systèmes et/ou les compagnies d'électricité, dans certains pays en partie grâce à la coordination des pouvoirs publics.

Tableau 4.2 Situation actuelle des réacteurs de génération III/III+

Réacteur	Type	Constructeur	Capacité (MWe)	Situation actuelle
EPR	REP	AREVA NP (France)	jusqu'à 1 750	<ul style="list-style-type: none"> • 1 tranche en construction en Finlande, devant être achevée en 2010 • 1 tranche commandée en France devant être achevée en 2012 • phase de pré-certification aux États-Unis
AP1000	REP	Westinghouse (États-Unis)	1 000	<ul style="list-style-type: none"> • concept certifié aux États-Unis en 2005
APR1400	REP	KHNP (République de Corée)	1 400	<ul style="list-style-type: none"> • 2 tranches en construction en République de Corée devant être achevées en 2013
ABWR	REB	Hitachi, Toshiba (Japon), GE (États-Unis)	1 350	<ul style="list-style-type: none"> • 3 tranches en exploitation au Japon depuis 1996 • concept certifié aux États-Unis en 1997
ESBWR	REB	General Electric (États-Unis)	1 390	<ul style="list-style-type: none"> • phase de certification aux États-Unis
SWR1000	REB	AREVA NP (Allemagne)	jusqu'à 1 290	<ul style="list-style-type: none"> • phase de conception
BWR 90 ⁺	REB	Westinghouse (Suède)	1 500	<ul style="list-style-type: none"> • phase de conception
IRIS	REP	Westinghouse (États-Unis)	335	<ul style="list-style-type: none"> • Demande de certificat de conception prévue en 2006, pour obtention en 2008-2010 • Phase de pré-certification aux États-Unis
PBMR	RRG	Eskom (République d'Afrique du Sud)	165 (module)	<ul style="list-style-type: none"> • Construction d'un prototype prévue à partir de 2006 • Certains grands composants commandés • Phase de pré-certification aux États-Unis
GT-MHR	RRG	General Atomics (États-Unis)	286 (module)	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de conception
ACR	REL	AECL (Canada)	Au plus 1 000	<ul style="list-style-type: none"> • phase de certification au Canada
CANDU 9	REL	AECL (Canada)	Au plus 1 300	<ul style="list-style-type: none"> • Approuvé en 1997

Remarque : Les abréviations sont indiquées dans l'annexe B.

Dans l'Union européenne, quatre modèles ont été élaborés pour répondre aux exigences communes des électriciens européens (*European utility requirements* (EUR)¹ : EPR, SWR1000, ESBWR et BWR 90⁺. Aux États-Unis, le *near-term deployment group* (Groupe de déploiement à moyen terme) étudie huit réacteurs évolutifs avancés : trois sont de type REP (AP1000/AP600, IRIS, SWR1000), deux de type REB (ABWR et ESBWR) et deux de type RHT (PBMR et GT-MHR).

1. <http://www.europeanutilityrequirements.org/>.

4.2.2 Technologie avancée de retraitement

Les usines de retraitement commerciales utilisent le procédé hydrométallurgique éprouvé PUREX (*plutonium uranium extraction*). Cependant, divers facteurs conduisent aujourd'hui à une conception plus élaborée du retraitement, visant à la séparation plus poussée des actinides pour les raisons suivantes :

- De nouvelles méthodes de gestion des déchets nucléaires de haute et moyenne activité sont à l'étude, dans lesquelles la séparation des radionucléides à vie longue est l'objectif principal.
- Des nouveaux cycles du combustible, comme ceux des RNR, et l'avènement possible de systèmes hybrides, exigent une nouvelle approche du retraitement.

Dans une version avancée du procédé PUREX, les actinides mineurs (américium, neptunium et curium) sont séparés lors d'une seconde phase aqueuse puis dirigés sur un système piloté par accélérateur pour un cyclage avec pyroprocessing (traitement électrométallurgique), lequel permet de les transmuter lorsque les systèmes de génération IV seront disponibles. Le flux de déchets résultant contient essentiellement des produits de fission. Le procédé PUREX peut également être perfectionné de sorte à récupérer l'iode par volatilisation et le technétium par électrolyse.

Une autre variante du procédé PUREX est mise au point par le DOE (ministère de l'Energie des États-Unis) pour les déchets civils. Cette fois, seul l'uranium est récupéré (d'où l'appellation procédé UREX ou UREX+) initialement pour être soit recyclé, soit stocké. Les déchets de faible activité tels que l'iode et le technétium peuvent aussi être récupérés lors du traitement initial. Le traitement des résidus permet de récupérer dans un premier temps le plutonium, pour le recycler dans les réacteurs conventionnels, puis les autres actinides, pour les transmuter dans des réacteurs rapides.

En République de Corée, KAERI travaille sur le cycle du combustible DUPIC (*direct use of spent REP fuel in CANDU reactors*) visant à l'utilisation directe du combustible usé des REP dans des réacteurs Candu. Ce cycle s'appuie sur des procédés thermiques et mécaniques par voie sèche pour fabriquer directement du combustible CANDU à partir du combustible usé des REP, sans séparer les matériaux fissiles et les produits de fission. Il présente divers avantages pour les pays exploitant des réacteurs REP et CANDU : énergie supplémentaire extraite du combustible, utilisation efficace de l'uranium naturel et nette réduction des déchets.

4.3 Programmes de soutien aux centrales et cycles du combustible de long terme

4.3.1 Systèmes nucléaires de génération IV

Pour jouer un rôle essentiel, les futurs systèmes d'énergie nucléaire devront répondre aux critères suivants : (1) déchets nucléaires gérables, utilisation efficace du combustible et impact réduit sur l'environnement ; (2) compétitivité ; (3) performance accrue en matière de sûreté ; et (4) meilleure résistance à la prolifération et protection physique.

4.3.1.1 Forum international Génération IV

Le Forum international Génération IV (GIF) a été constitué en janvier 2000, en tant que groupement d'entités gouvernementales, avec pour mission de faciliter la coopération bilatérale et multilatérale, en vue de mettre au point de nouveaux systèmes d'énergie nucléaire. Le GIF est une organisation officielle, reconnue par les pouvoirs publics, qui s'est engagée à poursuivre des activités

de R-D en coopération sur les systèmes prometteurs de la génération IV, dans le but de répondre aux enjeux énergétiques futurs. Il y a en effet beaucoup d'avantages à trouver un terrain d'entente entre des pays aux intérêts similaires et à partager l'expertise, les ressources et les installations d'essai pour gagner en efficacité et éviter la duplication des efforts.

Le GIF regroupe actuellement douze pays (Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, France, Japon, République d'Afrique du Sud, République de Corée, Royaume-Uni, Russie et Suisse) et l'EURATOM ; l'AEN est chargée du Secrétariat scientifique et l'AIEA dispose du statut d'observateur permanent. La participation de cette dernière permet en particulier d'assurer la coordination entre les activités du GIF et celles du projet INPRO (voir section 4.3.1.2).

Dans un cadre international une centaine de concepts de systèmes nucléaires avancés ont été examinés et évalués par rapport aux objectifs du programme Génération IV. Plus de 100 experts de 12 pays et organismes internationaux ont participé au processus. La sélection des systèmes retenus pour faire l'objet de recherche en coopération au sein du GIF a été basée sur la capacité des systèmes considérés à répondre aux objectifs retenus, ainsi que leur aptitude au déploiement et leur coût de développement. Publié en décembre 2002, le programme de développement technologique *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems* [19] identifie les six systèmes retenus (tableau 4.3) et décrit les voies de recherche et de développement à emprunter pour déterminer leur viabilité technique et commerciale, assurer leur démonstration et, éventuellement, leur commercialisation.

Tableau 4.3 Concepts de réacteurs de génération IV au sein du GIF

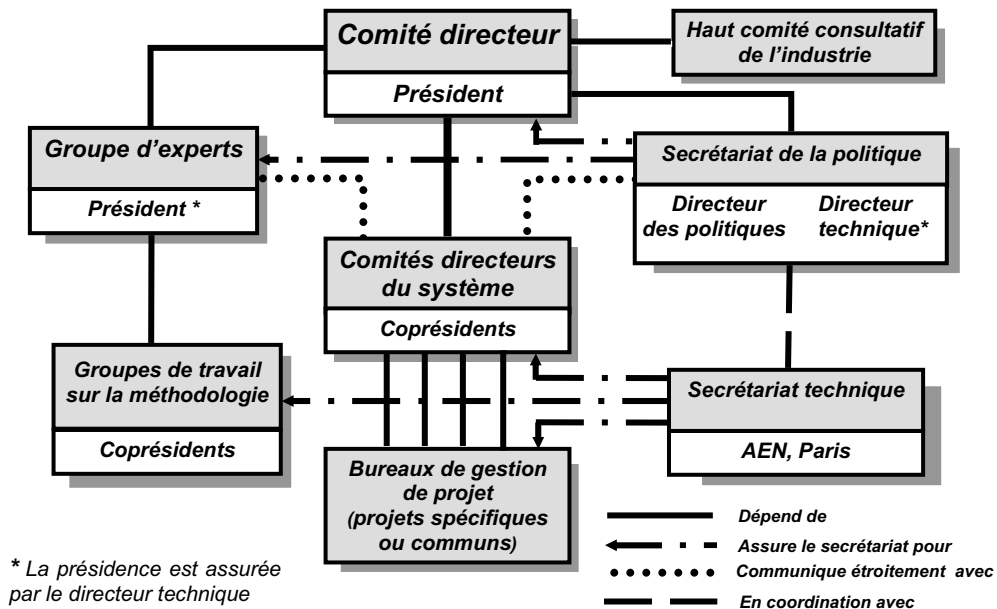
	Spectre neutronique	Caloporteur	Temp. (°C)	Combustible	Cycle	Puissance(s) (MWe)
Réacteurs rapides refroidis au gaz (GFR)	rapide	hélium	850	²³⁸ U	fermé, sur site	288
Réacteurs rapides refroidis au plomb (LFR)	rapide	Pb-Bi	550-800	²³⁸ U	fermé, régional	50-150 300-400 1 200
Réacteurs à sels fondus (MSR)	épithermique	sels fondus fluorés	700-800	UF dissous dans un sel	fermé	1 000
Réacteurs rapides refroidis au sodium (SFR)	rapide	sodium	550	²³⁸ U et MOX	fermé	150-500 500-1 500
Réacteurs refroidis à l'eau supercritique (SCWR)	thermique ou rapide	eau	510-550	UO ₂	ouvert (thermique) fermé (rapide)	1 500
Réacteurs à très haute température (VHTR)	thermique	hélium	1 000	prisme ou boulets d'UO ₂	ouvert	250

Adapté de Hirschberg, S., and Dones, R. (2005), « Sustainability Aspects of Current and Future Electricity Supply Systems », *Chimia*, Volume 59, n° 12.

Les comités directeurs de systèmes institués par le GIF sont chargés, avec les membres du GIF souhaitant participer à la R-D en collaboration, de mettre en œuvre la recherche et le développement nécessaires pour chaque concept de réacteur de génération IV. Chaque comité directeur de système

planifie les projets de R-D contribuant à la conception d'un système donné et assure leur cohérence. Les représentants des comités directeurs et les participants aux projets signent des accords régissant les droits de propriété intellectuelle et d'autres questions similaires, afin que les travaux sur les concepts puissent s'effectuer en coopération. La structure de gestion du GIF est illustrée sur la figure 4.2.

Figure 4.2 Structure de gestion du GIF



Actuellement, des plans détaillés de R-D destinés à combler les retards dans les différentes technologies retenues sont élaborés et examinés. En parallèle, des négociations ont lieu entre les membres du GIF sur le cadre contractuel de la collaboration multilatérale relative à ces technologies. Dans l'attente de l'application officielle de ces accords, des travaux de R-D se déroulent déjà sur une base informelle, avec l'appui de structures multilatérales existantes, notamment bilatérales.

Un « Accord-cadre sur la collaboration internationale en matière de recherche et de développement des systèmes d'énergie nucléaire de Génération IV » a été signé en 2005. Au mois de juin 2006, les Parties au dit Accord étaient le Canada, les États-Unis, la France, le Japon, la République de Corée, le Royaume-Uni, la Suisse, et l'EURATOM. Les États-Unis, la France et le Japon ont signé en février 2006 un accord sur les systèmes SFR, qui définit le cadre dans lequel s'inscrit la collaboration entre ces pays en matière de R-D sur ces réacteurs nucléaires avancés. La République de Corée a rejoint cet accord peu après.

De nombreux pays européens, qui ne sont pas membres du GIF, comme la Belgique, l'Espagne, la Finlande et la République tchèque participent aux efforts de R-D à travers l'EURATOM. Ainsi, la Finlande met en œuvre son programme Génération IV (GEN4FIN), comme indiqué dans l'encadré 4.1.

Encadré 4.1 Programme Génération IV de la Finlande (GEN4FIN)

Mission principale : renforcer l'expertise scientifique et technique dans le domaine des technologies de l'énergie nucléaire et des procédés associés, par la collaboration avec le GIF et les autres forums mondiaux.

Mission à long terme : créer de nouvelles activités pour l'industrie finlandaise par un meilleur transfert de technologie, la mise au point de procédés innovants et l'ingénierie des matériaux.

Le programme poursuit des objectifs scientifiques, technologiques et industriels. Parmi les principaux intervenants figurent la recherche et l'enseignement, les autorités de sûreté, l'industrie de transformation et les compagnies d'électricité, ainsi que des ministères et d'autres organisations associées.

Le programme GEN4FIN sera mis en œuvre par le biais de projets de R-D, de l'enseignement et de la formation, ainsi que de la collaboration internationale. Il devrait être planifié sur au moins cinq ans et que tous les principaux acteurs de la R-D en Finlande pourront apporter leur contribution. Cette période devrait correspondre au calendrier des études de base du GIF, sur la période 2005-2012. La phase de conception devrait suivre sur la période 2012-2020/2030.

Source : *Rapport national de la Finlande.*

4.3.1.2 Projet INPRO de l'AIEA

La Conférence générale de l'AIEA ayant invité ses États membres à s'associer sous son égide pour étudier les problèmes liés au cycle du combustible nucléaire et à s'interroger sur une technologie nucléaire innovante et résistante à la prolifération, l'AIEA a lancé en 2000 un projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles de combustible innovants (INPRO).

Les objectifs du projet INPRO, tels que définis dans son mandat, sont les suivants :

- Faire en sorte que l'énergie nucléaire soit disponible et contribue à répondre, de manière durable, aux besoins énergétiques du 21^e siècle.
- Réunir les États membres de l'AIEA intéressés, détenteurs et utilisateurs de la technologie, pour s'interroger conjointement sur les actions requises à l'échelon national et international pour réaliser les innovations souhaitées concernant les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible.
- Créer un mouvement rassemblant tous les partenaires concernés susceptibles d'influencer, d'utiliser ou de compléter les actions d'institutions existantes, ainsi que toutes les initiatives en cours à l'échelon national et international.

Lancée en mai 2001 et achevée en juin 2003, la phase 1A du projet INPRO s'est attachée à déterminer des principes de base, les exigences des pays utilisateurs, les critères à remplir par les systèmes nucléaires innovants et une méthodologie adaptée pour évaluer dans quelle mesure ils répondent à ces exigences [20]. La méthodologie INPRO, qui indique comment appliquer ces exigences pour évaluer un système nucléaire innovant donné, tout en prenant en compte les conditions locales, régionales et mondiales, a été publiée dans [21]. La phase 1B, qui a débuté en juillet 2003, porte sur la validation de la méthodologie du projet INPRO par des études de cas et sur l'examen des

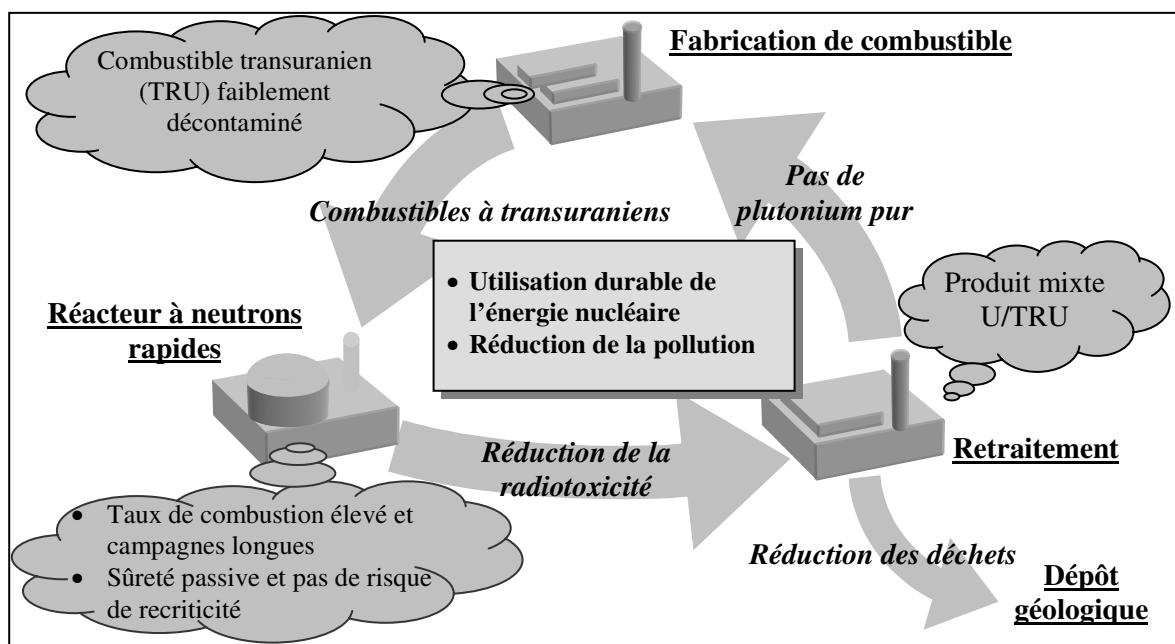
technologies innovantes présentées par les États membres de l'AIEA en matière d'énergie nucléaire. Au mois de mai 2006, le projet INPRO de l'AIEA comptait 26 participants².

Une fois la première phase achevée avec succès, il sera tenu compte de l'avis du comité directeur et, avec l'approbation des membres participants, la seconde phase du projet INPRO pourra être lancée. En s'appuyant sur les résultats de la première phase, elle étudiera, dans le cadre des technologies disponibles, la faisabilité d'un projet international, ainsi que l'identification des technologies qui pourraient avantageusement être mises en œuvre par les pays membres dans le cadre d'un tel projet.

4.3.1.3 Efforts nationaux en faveur des systèmes nucléaires de génération IV

Au Japon, comme le montre la figure 4.3, la JAEA et les compagnies d'électricité ont réalisé une étude de faisabilité d'un système réacteur à neutrons rapides et cycle du combustible. L'objectif est de présenter, vers 2015, un bilan du cycle RNR incluant les conditions de sa commercialisation et les plans de R-D pour y parvenir, en coopération avec le CRIEPI, les entreprises de l'industrie nucléaire et les universités, etc.

Figure 4.3 Concept d'études de faisabilité d'un système commercial RNR-cycle au Japon



Source : Rapport national du Japon.

Les États-Unis ont lancé l'initiative AFCI (*advanced fuel cycle initiative*), afin de développer et d'assurer la démonstration de technologies qui devraient leur permettre, ainsi qu'à d'autres pays industrialisés, de mettre en œuvre un cycle du combustible nucléaire à long terme amélioré, offrant de nets avantages en termes d'environnement, de résistance à la prolifération et d'économie par rapport au cycle actuel à passage unique. En 2006, les États-Unis ont proposé une nouvelle initiative, intitulée

2. Allemagne, Argentine, Arménie, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, EURATOM (depuis mai 2006), Espagne, États-Unis, Fédération de Russie, France, Inde, Indonésie, Japon, Maroc, Pakistan, Pays-Bas, République d'Afrique du Sud, République de Corée, République slovaque, République tchèque, Suisse, Turquie, Ukraine.

Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (*global nuclear energy partnership* – GNEP), qui englobe le programme de l'AFCI et d'autres éléments du programme nucléaire du DOE. Elle utilisera un cycle du combustible qui renforce la sûreté énergétique tout en favorisant la non-prolifération. Pour atteindre cet objectif, des nations disposant de capacités nucléaires avancées et sûres fourniront des services en matière de combustible – combustible neuf et récupération de combustible usé – à d'autres nations consentant à utiliser le nucléaire uniquement pour la production d'énergie. Le modèle de cycle du combustible fermé envisagé dans ce partenariat exige le développement et le déploiement de technologies permettant le recyclage et la consommation de déchets radioactifs à vie longue.

En France, des études prospectives conduites par le CEA et des partenaires industriels ont conduit à l'élaboration d'une stratégie de R-D sur les futurs systèmes d'énergie nucléaire à moyen et long terme (> 2040), qui vise trois objectifs complémentaires : (1) innovations pour les réacteurs à eau ordinaire ; (2) systèmes à neutrons rapides avec un cycle du combustible fermé permettant d'assurer un approvisionnement énergétique durable par la surrégénération à long terme et de gérer par ailleurs tous les actinides des REO ; et (3) développement des technologies nécessaires à la production nucléaire d'hydrogène ou à la fourniture de chaleur à très haute température pour l'industrie.

Le programme cadre de l'Union européenne comprend quatre projets concernant les systèmes de génération IV :

- VHTR (renommé RAPHAEL³, *reactor for process heat, hydrogen and electricity generation*) : projet intégré financé sur 4 ans à hauteur de 22 millions EUR, dont 9 millions EUR de la CE, lancé en avril 2005 et coordonné par AREVA NP Erlangen.
- GFR (renommé GCFR⁴, *gas-cooled fast reactor*) : projet spécifique ciblé en matière de recherche, financé sur 4 ans à hauteur de 3,6 millions EUR, dont 2 millions EUR de la CE, lancé en mars 2005 et coordonné par NNC.
- SCWR (renommé HPLWR, *high performance liquid water reactor*) : projet spécifique ciblé en matière de recherche et de formation, financé sur 3,5 ans à hauteur de 4,65 millions EUR, dont 2,5 millions EUR de la CE, qui devait être lancé en octobre 2006 et coordonné par FZK.
- LFR (renommé ELSY, *European lead-cooled system*) : projet spécifique ciblé en matière de recherche et de formation, financé sur 3 ans à hauteur de 6,5 millions EUR, dont 2,95 millions EUR de la CE, lancé en octobre 2006 et coordonné par Ansaldo Nucleare.

En République de Corée, KAERI met au point des technologies en vue de résoudre, à l'horizon 2016, les principaux problèmes techniques préalables à la commercialisation d'un SFR et à la réalisation d'un avant-projet détaillé du KALIMER (*Korea advanced liquid metal reactor*), réacteur censé répondre aux exigences des systèmes d'énergie nucléaire de génération IV.

4.3.2 Séparation et transmutation (S-T)

Dans le cadre des efforts accomplis à l'échelon mondial pour mettre en place des sources d'énergie durables, de nombreuses études sont entreprises sur les cycles du combustible avancés incluant séparation et transmutation (S-T), afin d'assurer la pérennité de l'énergie nucléaire. Les

3. <http://www.raphael-project.org/index.html>.

4. <http://www.gcfr.org>.

recherches en cours montrent les avantages potentiels de la S-T sur le plan de la simplification de la gestion des déchets radioactifs actuels et futurs, avec notamment :

- une nette réduction de la radioactivité, de la radiotoxicité et des stocks de matériaux fissiles, ce qui peut aider à mieux faire accepter les inévitables dépôts géologiques par le public ;
- une minimisation des sources de chaleur à moyen et long terme, ce qui peut permettre de réduire le volume requis pour les déchets de haute activité dans les dépôts, et ainsi améliorer leur capacité effective et réduire leur nombre.

Le Japon a mis au point un cycle avancé de combustible nucléaire pour RNR, basé sur la S-T, dont le concept est indiqué sur la figure 4.4. Dans ce dernier, le plutonium est récupéré en même temps que l'uranium, et des actinides mineurs, tels que le neptunium et l'américium, sont également récupérés à partir des combustibles usés. L'uranium et les éléments TRU (transuraniens) sont chargés dans les RNR comme combustibles.

En France, l'objectif général du programme S-T est d'étudier des solutions à même de réduire la quantité de radionucléides à vie longue, en les séparant des déchets puis en les transmutant en déchets non radioactifs ou à vie courte. En parallèle à la stratégie de référence de « séparation-transmutation », on étudie également une stratégie alternative de « séparation-conditionnement », qui fait intervenir des activités de R-D sur de nouvelles matrices de conditionnement spécifiques pour les radionucléides impropres à la transmutation.

Le Groupe de travail technique européen (ETWG) sur les systèmes hybrides (ADS) concluait, en avril 2001, dans son rapport « *A European Roadmap for Developing Accelerator-Driven Systems (ADS) for Waste Incineration* », que la S-T, associée aux systèmes hybrides et combinée aux dépôts géologiques, pouvait conduire à une solution acceptable par l'opinion publique sur le problème de gestion des déchets nucléaires. Le programme cadre de l'UE comporte quatre projets liés à la S-T :

- EUROTRANS⁵ (*European research programme for the transmutation of high level nuclear waste in an accelerator-driven system (ADS)* ou Programme européen de recherche pour la transmutation des déchets de haute activité dans un système hybride) : projet intégré financé sur 4 ans à hauteur de 43 millions EUR, dont 23 millions EUR de la CE, lancé en avril 2005 et coordonné par FZK.
- RED-IMPACT⁶ (Impact des technologies de S-T et de réduction des déchets sur l'évacuation finale des déchets nucléaires) : projet spécifique ciblé en matière de recherche, financé sur 3 ans à hauteur de 3,5 millions EUR, dont 2 millions EUR de la CE, lancé en mars 2004 et coordonné par KTH.
- EUROPART⁷ (Programme européen de recherche sur la séparation des actinides mineurs et de certains produits de fission à vie longue issus de déchets de haute activité dans le cadre du retraitement des combustibles nucléaires irradiés) : projet intégré financé sur 4 ans à hauteur de 10,3 millions EUR, dont 6 millions EUR de la CE, lancé en janvier 2004 et coordonné par le CEA.

5. <http://nuklear-server.fzk.de/Eurotrans/>.

6. <http://www.red-impact.proj.kth.se/>.

7. <http://www.europart-project.org>.

- ACTINET-6⁸ (*actinide sciences network* ou réseau pour les sciences actinides) : réseau d'excellence financé sur 4 ans à hauteur de 10,5 millions EUR, dont 6,3 millions EUR de la CE, lancé en mars 2004 et coordonné par le CEA.

4.4 Programmes hors production d'électricité

À strictement parler, les réacteurs qui produisent de l'énergie sous forme de chaleur peuvent fournir des produits énergétiques autres que l'électricité, notamment du chauffage urbain et de la chaleur industrielle, de l'eau potable et à terme de l'hydrogène. Si les applications hors électricité de l'énergie nucléaire ont été étudiées depuis le tout début de son développement, elles n'ont pas été déployées jusqu'ici à une échelle industrielle notable pour différentes raisons.

4.4.1 Production nucléaire d'hydrogène

Comme alternative à l'économie actuelle des combustibles fossiles, on envisage une économie de l'hydrogène, dans laquelle ce combustible jouerait un rôle majeur dans les systèmes d'énergie et servirait tous les secteurs de l'économie, se substituant aux combustibles fossiles. Au contraire de l'électricité, le vecteur d'énergie qu'est l'hydrogène peut être stocké en grandes quantités et, au niveau de l'utilisateur final, converti en électricité dans des piles à combustible en libérant de la chaleur et de l'eau comme uniques sous-produits. De plus, l'hydrogène peut être obtenu à partir de diverses sources d'énergie primaires, disponibles au niveau national dans la plupart des pays. Une économie de l'hydrogène renforcerait ainsi la sécurité de l'approvisionnement énergétique et la qualité de l'environnement à l'échelon mondial, à condition bien sûr que l'on utilise des technologies respectueuses de l'environnement pour le produire.

La condition préalable pour qu'une économie de l'hydrogène puisse être mise en œuvre, c'est que l'approvisionnement soit suffisant. Bien que cet élément abonde dans l'univers, il doit être produit, au moyen d'énergie thermique, électrolytique ou photolytique, à partir de composés qui en contiennent, tels que les combustibles fossiles, la biomasse ou l'eau. L'énergie nucléaire se prête à la production d'hydrogène car les réacteurs nucléaires peuvent produire à la fois la chaleur et l'électricité nécessaires à cette opération. De plus, c'est la seule source d'énergie d'origine non fossile commercialement parvenue à maturité et capable de produire de l'hydrogène à l'échelle industrielle sans émission notable de CO₂. Actuellement, l'hydrogène est essentiellement produit par vaporeformage de gaz naturel/méthane. Le vaporeformage utilisant l'énergie nucléaire offre de grandes possibilités pour la production massive d'hydrogène à court terme. Toutefois, ce procédé dégage du CO₂ en tant que sous-produit.

Une augmentation substantielle de la température de l'eau permet d'obtenir de l'hydrogène d'une façon plus efficace. L'électrolyse de la vapeur à des températures plus élevées (800 à 1 000°C) présente plusieurs avantages, notamment celui de réduire les besoins en électricité et d'accroître l'efficacité, ce qui permet de réduire les barrières d'activation aux surfaces de l'électrolyte. Aux températures élevées, on peut efficacement produire de l'hydrogène par la décomposition thermo-chimique de l'eau. Nombreux ont été les cycles thermo-chimiques potentiels testés pour évaluer leur viabilité et leur performance en matière de production d'hydrogène et les plus prometteurs tant sur le plan de l'efficacité que celui de la réalisation pratique sont ceux des sources de chaleur obtenues grâce à l'énergie nucléaires, tels que les cycles iode-soufre (IS), brome-calcium (Ca-Br) et cuivre-chlore (Cu-Cl). De plus, une autre option peut être envisagée, celle du procédé thermo-chimique hybride qui

8. <http://www.actinet-network.org>.

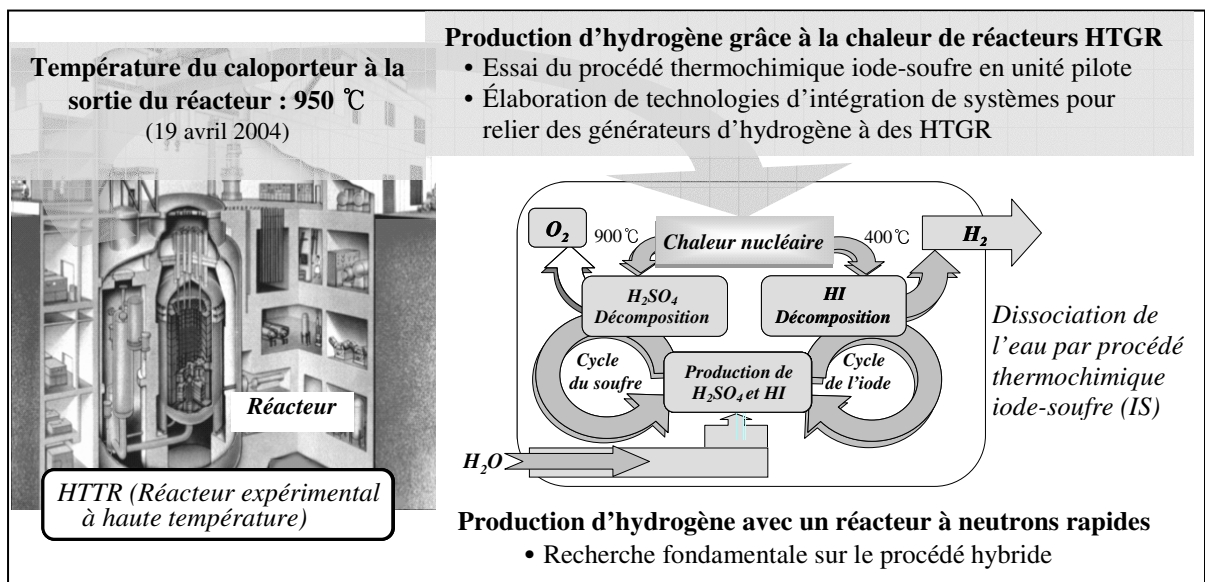
combine les réactions thermochimiques et électrolytiques de séparation de l'eau et permet de déclencher les réactions à basse température.

La fourniture de chaleur à haute température étant essentielle pour la production d'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire, les réacteurs à haute température, tels les VHTR, suscitent un intérêt croissant. Nombre de pays poursuivant un programme électronucléaire avancé ont également lancé des programmes sur la production nucléaire d'hydrogène, notamment, les États-Unis, la France, le Japon, la République de Corée, etc.

Aux États-Unis, la *nuclear hydrogen initiative* (NHI) est actuellement menée dans le cadre du programme sur l'hydrogène de la division de l'énergie nucléaire du ministère de l'énergie (DOE-NE). À partir du *hydrogen posture plan*⁹ et de la *National hydrogen energy roadmap*¹⁰ du DOE, la DOE-NE a mis au point le *nuclear hydrogen R&D plan*. Ce plan de R-D sur l'hydrogène nucléaire propose une stratégie de démonstration bien étayée, qui permet d'évaluer des technologies alternatives, tout en réalisant l'objectif que veut démontrer le programme. La NHI complètera sa mission de R-D par la mise au point d'une installation de démonstration de production d'hydrogène de 50 mégawatts (thermiques) expérimentale, qui sera reliée au réacteur de nouvelle génération NGNP, si ce réacteur est construit. Il se peut aussi que la mission soit réalisée en couplant une centrale de production d'hydrogène de démonstration à une source quelconque de chaleur à haute température.

L'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) a conduit au Japon des activités de R-D sur la technique de cogénération (production d'électricité et d'hydrogène) avec un réacteur à haute température refroidi au gaz (HTGR), en l'occurrence le réacteur expérimental à haute température HTTR, comme indiqué sur la figure 4.4. Ces activités ont été menés en collaboration avec des structures internationales de recherche conjointe, notamment NGNP aux États-Unis et le GIF.

Figure 4.4 Concept de production nucléaire d'hydrogène au Japon



Source : Rapport au niveau national du Japon.

9. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/posture_plan04.html.

10. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national_h2_roadmap.pdf.

En République de Corée, KAERI s'est lancée en 2005 dans un programme de R-D et de démonstration de 1 milliard USD visant à produire commercialement vers 2020 de l'hydrogène à l'aide de la chaleur d'une source nucléaire.

Les activités EURATOM dans ce domaine sont liées à la recherche communautaire sur les énergies non nucléaires. La production d'hydrogène est étudiée, en particulier, dans le projet HYTHEC (*hydrogen thermochemical cycles*) du 6^e PCRD, dans le cadre de la plateforme technologique européenne hydrogène/piles à combustible (HFP – *hydrogen and fuel cell technology platform*)¹¹. Deux documents importants sont en préparation en vue du programme de RTD du 7^e PCRD (2007-2013), qui sera proposé sur la base de cette plateforme technologique et réunira organisations du public et du privé : « *Strategic research agenda* », qui couvre la recherche et le développement ainsi que la démonstration et « *Deployment strategy* », qui couvre les évolutions du marché ainsi que la politique et l'infrastructure.

4.4.2 Dessalement nucléaire

Ce terme désigne la production d'eau potable à partir d'eau de mer en utilisant un réacteur nucléaire comme source d'énergie (électricité et/ou chaleur à basse température). Le réacteur peut être utilisé seulement pour le dessalement ou exploité en mode cogénération. Des expériences de dessalement nucléaire ont réussi sur divers sites au Japon (12 réacteurs depuis 1977) et au Kazakhstan (1 réacteur de 1973 à 1999). Beaucoup de pays, comme l'Argentine, le Canada, la Chine, l'Égypte, la France, l'Inde, l'Indonésie, la République de Corée, le Maroc, le Pakistan, la Russie et la Tunisie s'intéressent à des projets de dessalement nucléaire ou développent des projets de ce type, pour leurs propres besoins ou pour l'exportation [22].

La République de Corée a mis au point un concept d'unité de dessalement couplée à un réacteur SMART d'une puissance de 90 MWe pour fournir 40 000 m³ d'eau douce par jour et de l'électricité à un bassin de population d'environ 100 000 personnes ou à un complexe industriel. Le réacteur SMART est un réacteur à eau sous pression intégré avancé d'une puissance nominale de 330 MWth, dont les principaux composants sont logés dans une cuve unique.

11. Pour plus de détails sur la plateforme HFP, voir <https://www.hfpeurope.org/hfp/>.

5. CARACTÉRISTIQUES SPÉCIFIQUES DE L'INNOVATION DANS LE DOMAINE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

5.1 Caractéristiques spécifiques du secteur de l'énergie nucléaire

Bien que l'énergie nucléaire soit une technologie assez récente, on peut considérer qu'elle est parvenue à maturité aujourd'hui. Cela étant, il est admis qu'il existe en permanence des possibilités d'évolutions et d'améliorations technologiques innovantes. De plus, la technologie de l'énergie nucléaire présente des caractéristiques spéciales qui affectent la manière dont l'innovation est menée à bien. On peut regrouper ces caractéristiques suivant grandes quatre perspectives comme suit :

- technologie et connaissances requises pour l'utilisation de l'énergie nucléaire ;
- marché de l'industrie de l'énergie nucléaire ;
- environnement financier et économique ;
- environnement juridique et sociopolitique.

5.1.1 Technologie et connaissances

Actuellement, l'énergie nucléaire est utilisée dans de grandes installations complexes à systèmes multiples, qui produisent de l'électricité suivant un cycle thermique peu ou prou classique : fluide chauffé – turbine – générateur électrique. Seule la source de chaleur primaire pour le fluide chauffé est réellement nucléaire, mais son existence dans le processus influence grandement les spécifications et la conception de toute l'installation. L'innovation nucléaire couvre un large éventail de disciplines scientifiques et techniques (de la physique nucléaire à la conception des structures) et résulte de l'application de multiples technologies. On peut le constater dans la diversité des technologies liées aux cas types décrits dans la section 2.3. Mais dans chacun d'eux, les mêmes caractéristiques spécifiques sont toujours demandées, notamment en ce qui concerne les exigences de qualité particulière (qualité nucléaire), les objectifs en matière de sûreté nucléaire, etc.

À l'évidence, tous les pays ne sont pas prêts à réaliser seuls des projets relatifs à l'énergie nucléaire, car il faut une solide infrastructure technologique, depuis l'industrie lourde jusqu'aux organismes de soutien à la recherche, ainsi qu'un approvisionnement en certains composants, des capacités de formation, etc. Tout cela est nécessaire pour que la participation de la nation soit forte dans la construction d'une centrale nucléaire. De plus, pour innover dans toutes les technologies connexes, il faut qu'il existe une infrastructure de recherche très large et très active. Cet état est difficile à atteindre, même pour certains pays très avancés, c'est pourquoi les initiatives en matière de recherche nucléaire ont comme caractéristique particulière d'être en règle générale le fruit des efforts de R-D de différentes nations. Les pays de référence prennent généralement la tête de tels projets, mais il est souhaitable qu'ils soient rejoints par d'autres nations nucléaires, chacune avec sa spécialisation propre. L'autre caractéristique qui rend cette collaboration encore plus nécessaire, c'est que l'innovation de ce type est généralement étendue, coûteuse et de longue durée.

Il existe également à l'échelle internationale une inquiétude quant au détournement par un pays de la R-D pacifique pour mettre au point des armes nucléaires. Des accords internationaux très stricts sont en vigueur pour éviter cette situation et la diversion de techniques ou matières nucléaires civiles à des fins non-civiles. Néanmoins, la mondialisation de la recherche nucléaire est souvent limitée par

cette barrière. Cela entraîne également un problème de sûreté, car les connaissances et les matériaux nucléaires doivent être protégés de possibles emplois abusifs.

La recherche nucléaire porte sur des substances radioactives dont les émissions de rayonnements ionisants peuvent causer des dommages sanitaires et environnementaux si elles ne sont pas contenues. Cela suppose un autre ensemble de précautions très spécifiques qui, d'une part, constitue une autre discipline à part entière, appelée « radioprotection », et d'autre part, rend la R-D nucléaire plus complexe et plus gourmande en ressources.

En résumé, l'énergie nucléaire exige de longs délais de mise en oeuvre et requiert des installations importantes, complexes, intégrant plusieurs systèmes et répondant à des exigences de qualité très particulières (qualité nucléaire). La recherche liée à l'énergie nucléaire couvre toute une série de disciplines, qui demandent en règle générale des efforts de R-D importants et de longue haleine, absorbant de vastes ressources et incluant la participation de plusieurs pays. Cette même recherche doit par ailleurs également prendre en compte dans sa mise en place les questions de non-prolifération et de radioprotection.

5.1.2 Marché de l'industrie de l'énergie nucléaire

Dans le monde, 441 centrales nucléaires situées dans 31 pays produisaient environ 16 % de la demande d'électricité en 2005¹. Les centrales sont relativement peu nombreuses et concentrées dans un nombre de pays assez petit. Une importante infrastructure industrielle est nécessaire pour leur mise en oeuvre. Le marché de l'industrie nucléaire est caractérisé par un faible volume de transactions – les clients sont des grandes compagnies d'électricité ou des consortiums réunissant plusieurs d'entre elles, les technologies commercialement disponibles et les fournisseurs sont en nombre décroissant, et chaque installation vendue exige généralement un investissement très élevé.

La recherche étant coûteuse et de longue haleine, les fournisseurs de réacteurs, de génération III ou III⁺ par exemple, consacrent en général leurs efforts en matière de développement de produits au maintien et à l'actualisation de leurs modèles. Généralement, les stratégies innovantes doivent être lancées par les pouvoirs publics. L'évolution du marché obéit à une dynamique mixte ; d'un côté, il est poussé par la technologie (génération IV, par exemple), sous la direction des pouvoirs publics, et de l'autre, il est tiré par la demande (génération III⁺, par exemple), sous la conduite des compagnies d'électricité.

En résumé, l'industrie de l'énergie nucléaire constitue un marché avec un nombre relativement faible de transactions et représentant des montants élevés, dans lequel la recherche est initiée par les fournisseurs, les compagnies d'électricité et les pouvoirs publics. Ce marché est par ailleurs soumis aux dispositions d'accords internationaux, notamment en ce qui concerne la non-prolifération et les contrôles à l'exportation. L'énergie nucléaire est une technologie mature mais relativement récente qui dispose donc d'une belle dynamique propice à l'innovation.

5.1.3 Environnement économique et financier

Les centrales nucléaires exigent des investissements très élevés, mais elles ont une durée de vie technique généralement bien plus longue que la période nécessaire pour générer des revenus suffisants pour rembourser cet investissement. Cette longue durée de vie technique est renforcée par les impor-

1. Dans le cadre de l'OCDE, au début de l'année 2006, 352 réacteurs de 17 pays sur les 30 pays membres représentaient quelque 83 % de la capacité totale de production électronucléaire à l'échelon mondial et quelque 23.2 % de la fourniture totale d'électricité dans la zone OCDE [22].

tantes activités de R-D qui ont été menées, essentiellement sur le vieillissement des structures, de l'équipement et des composants, autrement dit, dans le domaine des matériaux.

Une longue durée de vie n'est pas la seule caractéristique rendant l'énergie nucléaire rentable. Elle se caractérise également par de faibles coûts d'exploitation et de combustible. Cela a été rendu possible grâce aux importants programmes de recherche sur le combustible et aux technologies élaborées pour assurer une excellente fiabilité des équipements. On peut donc aujourd'hui utiliser des combustibles à taux de combustion élevés permettant d'allonger les campagnes entre deux rechargements. Les nouvelles techniques de contrôle et de maintenance des équipements autorisent par ailleurs des disponibilités élevées. La production d'énergie dans les centrales nucléaires est donc très importante et les coûts unitaires (ratio coût/énergie produite) sont par conséquent particulièrement bas.

Cette situation est encore vraie même si l'on inclut les autres coûts, notamment les possibles externalités. Parmi les plus importantes pour l'énergie nucléaire pourraient figurer les coûts de démantèlement des centrales et d'évacuation des déchets radioactifs. Cependant, dans la plupart des pays exploitant des nucléaires ces coûts sont dorés et déjà internalisés par les producteurs d'électricité nucléaire. Les autres externalités, liées par exemple aux émissions radioactives inférieures aux limites légales, ont des valeurs très faibles qui n'affecteraient pas la compétitivité de l'énergie nucléaire si elles étaient internalisées.

En résumé, la technologie de l'énergie nucléaire se caractérise par un fort investissement de départ, une longue durée de vie technique et des retours élevés sur le capital investi, grâce aux faibles coûts unitaires du combustible et de l'exploitation, et des externalités minimales.

5.1.4 Environnement juridique et sociopolitique

Dans certains pays, l'environnement sociopolitique a porté un sérieux coup à l'énergie nucléaire et à la recherche dans ce domaine. Pour diverses raisons inhérentes à son origine et à sa nature propre, l'énergie nucléaire est un thème socialement très sensible et son utilisation soulève des défis sociopolitiques dans certains. Les principales préoccupations au niveau social portent sur les questions de prolifération, de déchets radioactifs à vie longue et d'incidences sur le milieu en cas d'accidents graves avec libération de substances radioactives dans l'environnement. Pour maîtriser ces effets indésirables, l'énergie nucléaire dispose d'une réglementation et de contrôles parmi les plus stricts, qui dépassent même ceux de l'industrie aéronautique ou spatiale.

Parmi les effets positifs reconnus de l'énergie nucléaire on peut citer son rôle économique et social important au niveau des collectivités locales. Elle crée en effet de nombreux emplois primaires et secondaires dans les régions où elle est mise en œuvre. Par ailleurs, au plan national, elle procure une très grande sécurité dans l'approvisionnement électrique et assure la fourniture en base à un coût bas et stable.

En résumé, l'énergie nucléaire est socialement et politiquement sensible à cause de différents problèmes directement liés à sa nature. Cela étant, les recherches passées et actuelles peuvent atténuer les possibles effets négatifs, et les bons aspects de l'énergie nucléaire pour la société, notamment le développement économique local ou la sécurité d'approvisionnement peuvent renforcer l'acceptation de cette technologie par la société.

5.2 Schémas de développement nucléaire

5.2.1 Différentes voies de développement

Les différents rapports nationaux ont permis d'identifier trois grands schémas.

Autonomie dès le départ

Aux commencements de l'énergie nucléaire (début des années 1950), plusieurs pays ont lancé des modèles nationaux pour la production d'énergie (électricité, chaleur, etc.) basée sur l'énergie nucléaire. Cette initiative a été promue par les différents gouvernements qui ont souhaité tirer parti de cette nouvelle source d'énergie. Cela étant, tous les développements n'ont pas donné lieu à un prototype commercial. Le cas n° 16 dans le tableau 2.1 – le réacteur DON en Espagne – en est un exemple. Seul un petit nombre de pays ont réussi à mettre au point leurs premiers modèles commerciaux. Les États-Unis avec les réacteurs à eau pressurisée et bouillante (REP et REB), le Canada avec le réacteur à eau lourde pressurisée (CANDU) ou le Royaume-Uni et de la France avec les réacteurs refroidis au gaz et modérés au graphite (RRG) sont des exemples de pays propriétaires de leurs technologies dès le départ. Le soutien initial des pouvoirs publics a généré une infrastructure industrielle pour le secteur nucléaire couvrant les réacteurs, les installations du cycle du combustible et la fabrication de composants et d'équipements.

Localisation par transfert de technologies importées de l'étranger puis autonomie

C'est le schéma le plus courant. Ces pays profitent d'abord du caractère international des fournisseurs de technologie nucléaire et, lorsqu'ils décident de promouvoir l'énergie nucléaire, demandent à ces fournisseurs de modèles éprouvés d'installer chez eux une première centrale. Pour les centrales suivantes, ils prennent une plus grande part à la conception et sont capables d'adapter le modèle initial aux besoins locaux. Pour les modèles qui viendront ensuite, ils sont capables d'assurer eux-mêmes tous les développements technologiques. C'est le cas du programme REP en France, ainsi que des programmes nucléaires du Japon et de la République de Corée.

Dépendance de l'étranger

Enfin, dans les pays où l'infrastructure technologique requise n'est pas entièrement achevée, différents fournisseurs livrent les concepts de base et dans certains cas également les projets détaillés (projets clés en mains). Les investissements associés aux projets nucléaires étant élevés, l'industrie locale participe généralement de manière croissante. Cette participation peut atteindre près de 90 % pour les travaux et fournitures, mais la conception initiale de l'îlot nucléaire revient toujours aux grands fournisseurs. C'est le cas en Belgique, en Espagne, en Finlande et en Suisse. Le cas de la République tchèque est différent. L'industrie tchèque a atteint un niveau assez élevé en matière de technologies, d'ingénierie et de fournitures, aussi bien pour le nucléaire que le matériel traditionnel. Elle dépend toutefois encore de l'étranger pour le combustible nucléaire et certains systèmes spécifiques (instrumentation et contrôle-commande, par exemple).

5.2.2 Caractéristiques communes

Comme indiqué à la section 5.2.1, le point de départ de l'infrastructure de recherche nucléaire peut différer suivant les types de pays, mais une fois qu'ils débutent dans l'énergie nucléaire, les éléments moteurs sont très similaires dans chacun d'eux, comme nous le verrons à la section 5.3.1.

L'un des principaux objectifs des pays nucléaires est de maîtriser suffisamment la technologie pour être à même d'exploiter et d'entretenir du mieux possible leur parc nucléaire. Comme indiqué à la section 5.1, cela suppose de pouvoir s'appuyer sur un très grand nombre de sciences, depuis la physique nucléaire jusqu'à la conception des structures, et sur une infrastructure de recherche. Tous les pays nucléaires souhaitant disposer de ces capacités, ils participent dans cet objectif à des collaborations internationales. Le programme international de l'EPRI, dont une grande partie est consacrée aux centrales nucléaires, est un bon exemple de ce type de collaboration internationale.

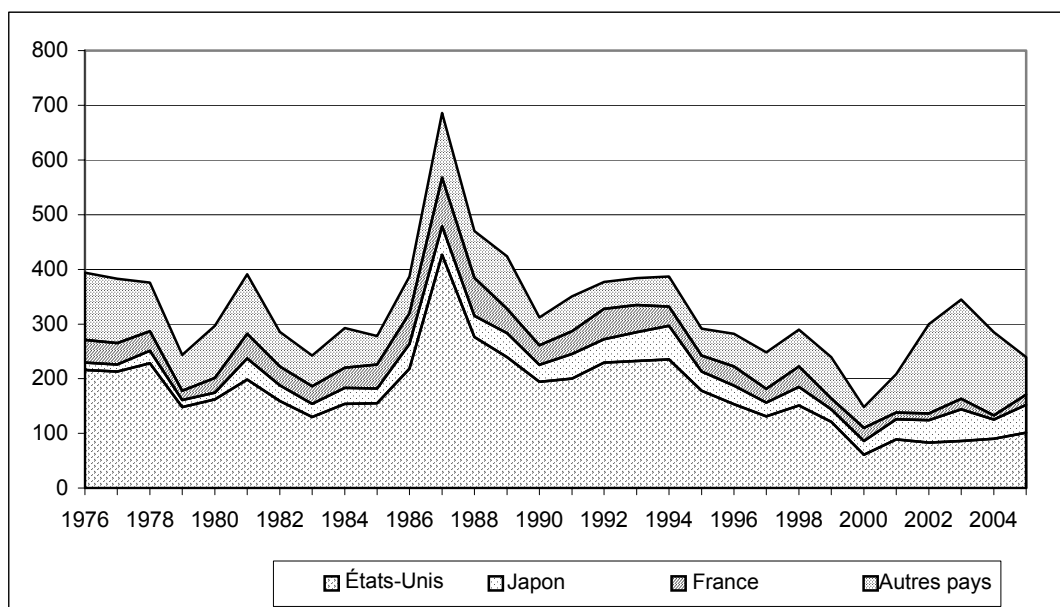
Dans certains pays, notamment ceux du premier et second groupes décrits à la section 5.2.1, des efforts supplémentaires sont accomplis en vue de mettre au point des concepts plus efficaces et des cycles du combustible qui minimisent les déchets radioactifs et réduisent les impacts sur l'environnement. Ce sont généralement les fournisseurs, avec l'appui des pouvoirs publics, qui conduisent ces initiatives de recherche, et des consortiums internationaux sont très souvent constitués pour mettre en commun coûts et technologie. C'est le cas de l'initiative Forum International Génération IV, qui doit ouvrir la voie à de futures générations de centrales et de systèmes nucléaires.

De nombreux acteurs sont intervenus dans les processus de développement nucléaire, notamment les pouvoirs publics, les compagnies d'électricité, les autorités de sûreté, les fournisseurs et les exécutants de la R-D. Bien que leurs rôles respectifs et l'intensité de leurs relations puissent différer selon les pays, il convient de noter que l'impulsion des pouvoirs publics et les liens étroits entre ces différents acteurs ont été essentiels au succès du développement nucléaire dans tous les cas.

5.2.3 Tendances des performances en matière d'innovation nucléaire

Les brevets et les publications sont souvent utilisés pour mesurer les performances en matière d'innovation. Dans le secteur du nucléaire, il s'est avéré difficile de réunir des données pertinentes. Néanmoins, les données relatives aux brevets concernant la technologie des réacteurs nucléaires figurant dans le rapport national transmis par les États-Unis livrent un aperçu dont on peut tirer une tendance générale. La figure 5.1 montre l'évolution du nombre de brevets américains dans la catégorie 376 (technologie des réacteurs nucléaires) de 1976 à 2005.

Figure 5.1 Évolutions du nombre de brevets relatifs à la technologie des réacteurs nucléaires des pays bénéficiaires de brevets auprès de l'Office des brevets et des marques des États-Unis (USPTO)



Source : Rapport national transmis par les États-Unis.

En partant de l'analyse des données (encadré 5.1), on peut noter une baisse des dépôts de brevets dans les années 1990 et une très légère hausse récemment. L'analyse de l'encadré 5.1 indique que l'environnement adéquat pour l'innovation en matière de technologie nucléaire est une combinaison d'investissements en R-D, autant publics que privés, de stabilité réglementaire, de politiques favorables des pouvoirs publics et de véritables incitations économiques.

Encadré 5.1 Analyse des brevets relatifs à la technologie des réacteurs nucléaires aux États-Unis

Il est admis qu'il existe une étroite corrélation entre les dépenses fédérales de R-D pour la recherche nucléaire et le nombre de brevets liés au nucléaire délivrés aux États-Unis. Depuis le début des années 1980, ces dépenses n'ont cessé de diminuer. Ce n'est que récemment que l'on a pu constater un regain d'intérêt pour les dépenses fédérales en faveur de la recherche nucléaire. En 1987, on est parvenu au chiffre record de 427 brevets US délivrés dans le domaine de la technologie des réacteurs nucléaires aux cessionnaires américains. En 2000, ce nombre a atteint son niveau le plus bas avec 61, mais il est remonté à 90 en 2004. La moyenne annuelle sur la période 1976-2005 a été de 175 brevets.

Cela étant, l'examen de l'ensemble des brevets délivrés aux États-Unis dans cette catégorie sur les 30 dernières années donne à penser que d'autres facteurs ont peut-être aussi leur importance. Durant cette période, 9 837 brevets américains au total ont été publiés, avec en moyenne environ 328 nouvelles publications par an. Le maximum et le minimum pour l'ensemble de cessions de brevets sont intervenus au cours des mêmes années que les maximum et minimum concernant les cessionnaires américains, avec respectivement 686 et 148 cessions pour ces derniers.

Sur la période 1976-1981, le nombre de brevets délivrés a été au dessus de la moyenne au cours de quatre de ces six années. Cette période coïncide par ailleurs avec la période antérieure à 1979, lorsque les compagnies américaines passaient encore commande de nouvelles centrales nucléaires.

Sur la période 1982-1985, le nombre de brevets publiés a été inférieur à la moyenne. Le fait qu'aucune nouvelle centrale n'ait été commandée aux États-Unis après 1978 a probablement joué un rôle dans cette baisse.

La période 1986-1994 a marqué l'apogée de l'innovation technologique en matière de réacteurs nucléaires aux États-Unis. Sur huit des neuf années que compte cette période, le nombre de brevets américains publiés a dépassé la moyenne. Plusieurs facteurs ont pu jouer un rôle dans cette reprise. Si le DOE a stoppé les crédits pour le réacteur surrégénérateur de Clinch River en 1983, il a dans le même temps ouvert des crédits pour le programme *advanced light water reactor* (ALWR). C'est sur la période 1986-1994 que ce dernier a le plus progressé. Dans ce même temps et en l'absence de construction de nouvelles centrales, l'industrie a innové pour accroître la productivité. Une partie des innovations et des brevets qui en ont résulté durant cette période sont probablement plus le fruit de la nécessité que d'une augmentation des fonds alloués à la R-D. Il serait également intéressant de connaître le nombre d'universités américaines qui ont commencé à déposer et se voir décerner des brevets américains au cours de cette période. La loi Bayh-Dole de 1980 et les notes d'application qui ont suivi au milieu des années 1980, ont conduit à une augmentation notable du nombre de dépôts. La loi Bayh-Dole et la loi Stevenson-Wydler, son corollaire, ont permis aux bénéficiaires de fonds fédéraux pour la R-D de rester propriétaires de leurs inventions et de les breveter. Il se peut que ce changement de politique des pouvoirs publics ait contribué à l'augmentation du nombre de brevets publiés.

La période 1995-2001 correspond à la plus faible publication de brevets. Au cours de ces sept ans, le nombre de brevets publiés est resté sous la moyenne. La loi de politique énergétique (*Energy Policy Act*) de 1992 et la déréglementation des entreprises de service public d'électricité qui s'en est suivie, ont probablement contribué à cette baisse, pour les raisons indiquées plus haut dans ce rapport. Le financement du programme ALWR par le DOE, qui a cessé en 1998, pourrait avoir contribué au faible nombre de brevets publiés.

Bien qu'il y ait eu une légère augmentation du nombre de brevets délivrés en 2005 aux pays nucléaires traditionnels que sont le Canada, les États-Unis, la France, la Grande-Bretagne et le Japon, la croissance la plus forte est le fait de pays émergents, comme la Chine, la République de Corée ou d'autres encore. Une partie de cette croissance est probablement liée à une plus grande stabilité réglementaire dans les pays industrialisés, mais aussi à de plus grandes incitations économiques et politiques dans les pays en développement.

Source : *Rapport national des États-Unis.*

5.3 Caractéristiques des systèmes d'innovation nucléaire

5.3.1 Éléments moteurs de l'innovation en matière de technologie nucléaire

L'identification des éléments moteurs de l'innovation en matière de technologie nucléaire permet d'évaluer l'efficacité de l'innovation et de définir les politiques requises. Les éléments moteurs sont différents suivant les secteurs technologiques considérés. Les secteurs sur lesquels se concentre l'innovation nucléaire varient en fonction de la politique énergétique nationale et de l'état d'avancement de l'industrie nucléaire du pays concerné.

L'étude des rapports et études de cas des différents pays montre que l'innovation nucléaire est déterminée par divers éléments moteurs ou facteurs de motivation. S'il existe des éléments moteurs différents suivant les technologies, ainsi que des facteurs de motivation prioritaires différents suivant les aspects considérés, notamment les politiques et plans énergétiques et nucléaires à l'échelon national, ainsi que, dans une moindre mesure, différentes structures organisationnelles pour le secteur nucléaire, il est clair toutefois qu'il existe certains éléments moteurs fondamentaux ou directeurs communs concernant l'innovation nucléaire. Les rapports et les études de cas ont permis de dégager les trois grands éléments moteurs suivants :

- **Facteurs liés au marché** : ils comprennent divers aspects, notamment les améliorations économiques, les applications hors électricité, les méthodes de gestion des risques commerciaux, les accords de fourniture et de service, les exigences concernant le choix d'un site et la puissance électrique.
- **Facteurs liés aux politiques** : ils recouvrent des aspects de politique générale, notamment les exigences réglementaires dans le domaine de l'environnement et de la sûreté nucléaire, la non-prolifération et la protection physique, les incitations à la collaboration internationale (ainsi que les politiques de collaboration bilatérale), l'ensemble des politiques énergétiques nationales et des stratégies d'approvisionnement en électricité.
- **Facteurs techniques** : ils concernent les paramètres d'exploitation des installations électro-nucléaires, notamment l'efficacité et l'amélioration de l'aptitude au fonctionnement, les exigences en matière d'amélioration des matériaux et d'allongement du service, l'utilisation de l'uranium, les progrès concernant l'instrumentation et le contrôle-commande, les méthodes de construction, les techniques de gestion de projet et de construction, ainsi que la simulation et la modélisation informatiques avancées.

D'ordinaire, ces trois éléments interviennent de concert en faveur de l'innovation nucléaire. Ainsi, dans le cas des initiatives d'innovation nucléaire comme le GIF, la motivation est essentiellement déterminée par la politique générale et les intérêts techniques, puis par la réponse aux besoins apparents du marché à long terme, notamment en termes de durabilité et d'économie. Dans d'autres cas, comme celui du programme ALWR aux États-Unis, co-fondé par le DOE, ou le programme canadien de développement du réacteur avancé CANDU, le principal facteur de motivation est à chaque fois la nécessité d'innovation technique, afin de répondre aux besoins du marché à court et moyen termes. Cela étant, le fait que ces deux initiatives bénéficient de fonds publics souligne combien la politique des pouvoirs publics est un facteur de motivation important.

5.3.2 Principaux acteurs

5.3.2.1 Pouvoirs publics et agences gouvernementales

Les pouvoirs publics jouent depuis toujours un rôle essentiel pour l'innovation nucléaire à de nombreux égards. Ils sont les premiers à pouvoir prendre la décision d'utiliser ou non l'énergie

nucléaire dans un pays, et à encourager et aider les compagnies d'électricité à choisir cette option. Ils sont aussi responsables de la mise en place des infrastructures de départ pour la recherche en technologie nucléaire, avec une implication plus ou moins importante, qui dépend généralement de la voie de développement retenue. Cela étant, même dans un scénario plus évolué, avec une énergie nucléaire en place depuis longtemps, les pouvoirs publics ne peuvent s'en remettre uniquement aux forces du marché. Il faut au minimum que les développements concernant des thèmes spécifiques, comme la gestion des déchets radioactifs et les sciences fondamentales, notamment l'étude des effets des radiations, soient pris en charge par les pouvoirs publics, afin que ces derniers puissent garantir que l'exploitation des centrales nucléaires n'entraîne pas de conséquences inacceptables. De plus, les programmes nucléaires spécifiques exigeant d'importantes infrastructures doivent être soutenus par des fonds publics, comme le sont d'autres activités industrielles importantes pour le pays. Enfin et surtout, les pouvoirs publics jouent un rôle important en tant que coordinateurs des capacités nationales et comme des interfaces dans les projets internationaux sur les modèles du futur.

En règle générale, de nombreuses agences gouvernementales interviennent dans le processus d'innovation nucléaire dans une perspective aussi bien horizontale que verticale, compte tenu de la nature interdisciplinaire et politique de l'énergie nucléaire, ce qui rend le processus d'innovation dans ce domaine souvent plus difficile que dans d'autres. Dans la perspective horizontale, l'innovation nucléaire suppose la bonne coordination de nombreuses politiques : politique énergétique, politique du développement scientifique et technologique, politique environnementale, politique industrielle, politique de réglementation en matière de sûreté et politique de sécurité nationale. Elle fait donc intervenir nombre de ministères et d'agences gouvernementales, comme on peut le voir au Japon, dont le cas est illustré dans l'encadré 5.2. Dans la perspective verticale, l'innovation nucléaire mobilise tous les niveaux de la hiérarchie des pouvoirs publics, depuis les hauts dirigeants jusqu'aux groupes d'experts, en passant par les guides d'opinion.

Le tableau 5.1 donne les agences gouvernementales chargées de la politique électronucléaire, de la politique de R-D nucléaire et de la réglementation de sûreté dans les pays participants.

Les autorités de sûreté et les organisations techniques de sûreté associées peuvent provoquer l'innovation nucléaire par leurs prescriptions. Dans le même temps, ce sont également des utilisateurs finaux de la technologie ; non pas des utilisateurs de produits finis, comme les compagnies d'électricité, mais plutôt des consommateurs de connaissances de base leur permettant de juger si les solutions particulières adoptées par les compagnies d'électricité sont ou non appropriées. En fait, les autorités de sûreté devraient collaborer directement avec et promouvoir les centres de recherche, afin d'être à même d'assurer leur fonction en toute indépendance.

Aux tout débuts, l'engagement et le soutien des pouvoirs publics étaient considérables, mais la situation a évolué, notamment suite à la commercialisation de l'énergie nucléaire. Dans les pays favorables au nucléaire, l'engagement reste en grande partie le même ou comparable, même si les priorités et l'objectif central sont différents. Toutefois, dans beaucoup d'autres pays industrialisés, cet engagement a disparu ou fortement diminué. Dans les pays en développement qui s'intéressent à l'option nucléaire, l'engagement et le soutien en faveur du nucléaire restent en général relativement élevés, notamment s'ils poursuivent des politiques d'amélioration et d'extension de leurs programmes électronucléaires.

De nombreuses agences gouvernementales intervenant dans l'innovation nucléaire, une bonne coordination au sein des pouvoirs publics est extrêmement importante.

Encadré 5.2 Pouvoirs publics et agences gouvernementales de l'énergie nucléaire et leurs rôles au Japon

Bureau du Conseil des ministres

➤ Conseil de la politique scientifique et technologique

- Enquêtes et délibérations sur les politiques de base concernant la science et la technologie
- Enquêtes et délibérations concernant les lignes directrices relatives à l'affectation de ressources budgétaires/humaines
- Évaluation de la R-D importante à l'échelon national, etc.

➤ Commission de l'énergie atomique

- Planification/investigation/décision des politiques pour la recherche, le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire
- Enquêtes et délibérations sur les lignes directrices concernant l'affectation de ressources budgétaires pour la recherche, le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire
- Estimations et plans pour la recherche, le développement et l'utilisation de l'énergie nucléaire par les agences gouvernementales compétentes, etc.

➤ Commission de la sûreté nucléaire

- Promotion de la recherche en sûreté nucléaire
- Revue des revues de sûreté des agences de réglementation (système de double contrôle)
- Amélioration des recommandations de sûreté nucléaire
- Revues successives des règlements, etc.



MEXT*

Promotion

- Politique de l'énergie nucléaire liée à la science et à la technologie [valorisation des ressources humaines, etc.]
- Développement de la technologie nucléaire pour la promotion de la science et de la technologie [cycle RNR, fusion nucléaire, accélérateur, faisceaux de rayonnement, etc.]

Réglementation de sûreté

- Réacteur expérimental et de recherche
- Utilisation de matériaux nucléaires
- Systèmes de garanties

METI*

ANSE*

- Politique de l'énergie nucléaire concernant l'utilisation de l'énergie [Promotion des centrales nucléaires, cycle du combustible]
- Développement de la technologie nucléaire pour utilisation énergétique [Centrale nucléaire, cycle du combustible, traitement/ évacuation des déchets de haute activité, etc.]

NISA*

- Réglementation de sûreté pour les centrales nucléaires, traitement de l'uranium, fabrication du combustible, retraitement, évacuation des déchets et centrales nucléaires au stade de la R-D (MONJU, FUGEN)
- Recherche liée à la réglementation de sûreté

MOFA*

- Politique étrangère en matière de non-prolifération et d'usage pacifique d'énergie nucléaire
- Préparation d'accords internationaux
- Participation aux activités d'organisations internationales telles l'AIEA
- Négotiations et coopération avec d'autres pays

Autres*

MAFF, MHLW, MLIT

*ANSE : Agence des ressources naturelles et de l'énergie ; MAFF : Ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche ; METI : Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie ; MEXT : Ministère de l'Éducation, de la Culture, des Sports, des Sciences et de la Technologie ; MHLW : Ministère de la Santé, du Travail et de la Sécurité sociale ; MLIT : Ministère de l'Aménagement du territoire, de l'Infrastructure et des Transports ; MOFA : Ministère des Affaires étrangères ; NISA : Agence de la sûreté nucléaire et industrielle.

Source : Rapport national du Japon.

Tableau 5.1 Agences gouvernementales ayant un rôle dans le domaine de l'énergie nucléaire

Pays	Énergie nucléaire	R-D nucléaire	Réglementation de sûreté
Belgique	Service public fédéral économie, PME, classes moyennes et énergie	Service public fédéral économie, PME, classes moyennes et énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Service public fédéral emploi, travail et concertation sociale • Service public fédéral intérieur • Agence fédérale de contrôle nucléaire
Canada	Ministère des Ressources naturelles	Énergie atomique du Canada limitée (EACL)	Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN)
Commission européenne	DG TREN (Traité EURATOM)	DG Recherche, DG CCR	DG TREN (Contrôle de sécurité EURATOM)
Espagne	Ministère de l'Industrie, du Commerce et du Tourisme	<ul style="list-style-type: none"> • Ministère de l'Éducation et des Sciences • Ministère de l'Industrie, du Commerce et du Tourisme 	Conseil de sûreté nucléaire relevant du Parlement
États-Unis		Department of Energy (DOE)	Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Finlande	Ministère du Travail et de l'Industrie (MTI)	MTI	STUK (Autorité de sûreté nucléaire et radioactive), relevant du ministère des Affaires sociales et de la Santé
France	Ministère de l'Industrie	Commissariat à l'énergie atomique (CEA)	Autorité de sûreté nucléaire (ASN)
Japon	Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI)	<ul style="list-style-type: none"> • METI • Ministère de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT) • Ministère des Affaires étrangères (MOFA) 	<ul style="list-style-type: none"> • Agence de la sûreté nucléaire et industrielle (NISA) relevant du METI (centrales commerciales) • MEXT (installations non utilisées pour la production d'électricité, réacteurs de R-D)
République de Corée	Ministère du Commerce, de l'industrie et de l'énergie (MOCIE)	Ministère des sciences et de la technologie (MOST)	MOST
République tchèque	Ministère de l'Industrie et du Commerce	<ul style="list-style-type: none"> • Conseil tchèque pour la R-D • Ministère de l'Éducation et de la Jeunesse 	Office national de sûreté nucléaire
Suisse	Office fédéral de l'énergie (OFEN) relevant du département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)	Conseil des écoles polytechniques fédérales au sein du Groupement de la science et de la recherche relevant du Département fédéral de l'Intérieur	<ul style="list-style-type: none"> • Division principale de la sécurité des installations nucléaires (HSK) • Commission fédérale de la sécurité des installations nucléaires (CSA)

La coordination intergouvernementale prend de l'importance, comme le montrent les récentes initiatives de collaboration internationale en matière de R-D, notamment GIF et INPRO. On note par ailleurs de plus en plus de signes d'un renforcement de la collaboration internationale dans le domaine

de la sûreté et de la réglementation, laquelle est appuyée par des agences internationales, telles l’AIEA et l’AEN, notamment grâce à des instruments juridiques internationaux comme la Convention sur la sûreté nucléaire. En outre, l’AEN joue au sein de l’OCDE un rôle important comme l’un des principaux forums pour les échanges d’informations et l’élaboration des politiques.

5.3.2.2 Exécutants de la R-D

Les exécutants de la R-D forment la véritable épine dorsale du système d’innovation, car ils se doivent de maîtriser les connaissances de base pour offrir des solutions aux niveaux conceptuel et appliqué aux fournisseurs de systèmes. Les exécutants de la R-D nucléaire regroupent les organismes de recherche publics (ORP), les organisations de recherche industrielle (ORI), les universités, ainsi que les services de R-D internes aux entreprises industrielles. Le tableau 5.2 présente les principaux exécutants de la R-D dans les pays participants.

Tableau 5.2 Principaux exécutants de la R-D nucléaire dans les pays participants

Pays	ORP	ORI	Autres
Belgique	SCK•CEN	Laborelec	Universités
Canada	EACL	Groupe des propriétaires de CANDU	Universités (UNENE)
Commission européenne	Centres de recherche communs (établissements de la DG CRC à Karlsruhe, Petten et Ispra)	Contractants industriels de projets de DG Recherche	Contractants de l’éducation et de la formation de DG Recherche
Espagne	CIEMAT	UNESA, TECNATOM, IBERINCO, SOLUZIONA	Universités
États-Unis	Laboratoires nationaux	Institut de recherche de l’industrie électrique (EPRI)	
Finlande	VTT		Fortum, TVO
France	Commissariat à l’énergie atomique (CEA)		
Japon	Agence japonaise de l’énergie atomique (JAEA)	Institut de recherche central de l’industrie électrique (CRIEPI)	<ul style="list-style-type: none"> • Universités • R-D interne au sein de Mitsubishi, Hitachi, Toshiba, etc.
République de Corée	Institut coréen de recherche sur l’énergie atomique (KAERI)	Institut de recherche coréen de l’industrie électrique (KEPRI)	R-D interne au sein de la Korea Hydro Nuclear Power Company (KHNP), de la Korea Nuclear Fuel Company (KNFC) et de Doojung
République tchèque	NRI Rez		UJF – Institut de physique nucléaire de l’Académie des sciences de la République tchèque
Suisse	Institut Paul Sherrer (IPS)		

Dans de nombreux pays, les organismes de recherche publics (ORP) ont joué un rôle déterminant dans le développement nucléaire, mais ce rôle évolue actuellement, en particulier dans les pays poursuivant une politique d’abandon progressif du nucléaire. Suite à la baisse du nombre de commandes de centrales et aux changements des politiques énergétiques dans certains pays, de nombreux ORP sont confrontés à des problèmes d’identité, lesquels conduisent à une extension de leur champ d’activités à des domaines non nucléaires.

Les ORP ont été lancés à l'origine par les pouvoirs publics et doivent être maintenus, grâce à leur soutien, à un niveau adéquat et durable, de sorte à pouvoir intervenir en cas de problèmes. Ces organismes doivent être très accessibles et flexibles, de sorte à pouvoir répondre aux problèmes éventuels posés par les fournisseurs et les compagnies d'électricité. Dans les petits pays, il est difficile et pas très efficace que plusieurs centres de recherche soient dédiés à un même thème. Cela entraîne en effet une dispersion des ressources et peu de possibilités de disposer d'une masse critique capable de perdurer en toutes circonstances. Aussi, des concepts comme les Centres de référence en Espagne, dans le cadre desquels des organismes de recherche sont sélectionnés pour un thème donné, pourraient être intéressants. Ces derniers sont présentés dans l'encadré 5.3.

Encadré 5.3 Centres de référence en Espagne

Objectifs : les Centres de référence (CR) sont des institutions technologiques espagnoles disposant de capacités variées dans un ou plusieurs domaines liés à la technologie nucléaire, et qui sont choisies en Espagne par les utilisateurs de technologie (promoteurs) pour coordonner les recherches dans un domaine spécifique. L'objectif de ce système est de concentrer les ressources et d'obtenir ainsi une masse critique, capable de maîtriser la technologie la plus avancée dans ce domaine. Les CR ont entre autres pour obligation d'établir des réseaux appropriés avec d'autres institutions de recherche espagnoles et étrangères, et de créer ainsi des synergies avec l'infrastructure de recherche espagnole.

Modes de fonctionnement : les différents promoteurs (compagnies d'électricité, autorités de sûreté, fournisseurs, etc.) ont chacun des relations différentes avec les CR. Les compagnies d'électricité espagnoles, qui participent à divers projets internationaux, comme les Groupements d'utilisateurs, l'EPRI, etc., leur fournissent les informations technologiques résultant de leur participation à ces projets, afin qu'ils les intègrent et les appliquent aux centrales nucléaires espagnoles. L'autorité de sûreté subventionne des propositions de R-D spécifiques de ces CR. Les autres utilisateurs de technologie passent directement des contrats pour des thèmes particuliers.

Rôles des Centres : les CR doivent à la fois assister les utilisateurs de technologie dans leur domaine de compétence et participer à des projets internationaux pouvant présenter un intérêt pour les promoteurs. En principe, l'intégration de la technologie est prise en charge par le CR sur son propre budget, et seule l'application dans les centrales espagnoles est financée par les compagnies d'électricité. La participation à des projets internationaux est en principe financée par les projets concernés.

Nombre de Centres : actuellement, les CR désignés comme tels sont le laboratoire national CIEMAT, les entreprises d'ingénierie TECNATOM, IBERINCO et SOLUZIONA, qui appartiennent aux compagnies d'électricité, et le fournisseur de combustible ENUSA. D'autres CR sont identifiés et en cours de désignation. La liste complète figure dans le rapport national de l'Espagne.

Source : Rapport national de l'Espagne.

Avec la commercialisation croissante de l'énergie nucléaire, les organisations de recherche industrielle sont devenues des acteurs clés dans le processus d'innovation des technologies nucléaires évolutives, particulièrement lorsque le soutien des pouvoirs publics en faveur de la R-D nucléaire faiblissait. En fait, dans un marché toujours plus déréglementé, elles ont un rôle important pour le traitement des questions et des problèmes spécifiques identifiés par l'industrie. En règle générale, les activités de R-D sont spécifiques et ciblées sur des problèmes identifiés. La recherche fondamentale est rare, voire inexistante. Ces organismes ont par ailleurs tendance à s'internationaliser.

Dans certains cas, les universités jouent un rôle important pour l'innovation technologique dans l'énergie nucléaire. Plus généralement toutefois, elles jouent un rôle important pour les sciences nucléaires de base (constantes nucléaires, par exemple) et la mise à disposition de ressources humaines, qualifiées grâce à l'enseignement. Les programmes d'ingénierie nucléaire dans les universités sont essentiels pour le futur de l'énergie nucléaire, compte tenu des problèmes généralisés de vieillissement du personnel dans les pouvoirs publics et l'industrie. On peut citer à cet égard l'expérience du Canada avec la mise en place de l'UNENE (*University Network of Excellence in Nuclear Engineering* ou Réseau d'excellence universitaire en génie nucléaire). C'est un dispositif dans le cadre duquel les universités canadiennes participantes assurent une formation dans divers domaines nucléaires, avec le soutien financier des compagnies d'électricité canadiennes et de l'EACL. Plusieurs chaires de recherche sont également financées.

5.3.2.3 Fournisseurs de systèmes, de composants et de services

Les fournisseurs sont les principaux acteurs de l'innovation nucléaire, dans le sens où ils proposent des produits innovants à leurs clients – les fournisseurs d'énergie. Sans leur volonté d'introduire des éléments innovants, l'innovation nucléaire serait pratiquement impossible. Dans les fournisseurs figurent les constructeurs nucléaires, qui fournissent des installations nucléaires, notamment des centrales, des usines de dessalement, des usines de production d'hydrogène, des centrales de cogénération et des installations de cycle du combustible ; les entreprises manufacturières, qui fournissent l'équipement ; les fournisseurs de combustibles ; les entreprises de retraitement ; les entreprises de gestion des déchets ; et les fournisseurs de services (voir tableau 5.3).

Les fournisseurs devraient être des acteurs qui, en collaborant avec les pouvoirs publics, contribuent à la mise en place de l'infrastructure de recherche appropriée, de sorte à trouver des solutions innovantes aux problèmes concernant le fonctionnement des centrales actuelles et la conception des centrales futures. Ce groupe comprend divers représentants, depuis les grands fournisseurs, comme Westinghouse, GE ou AREVA, jusqu'aux fournisseurs locaux de technologie dans un domaine spécifique, les essais de matériaux non destructifs, par exemple. Les fournisseurs ont par ailleurs un rôle important à jouer dans la définition des futurs concepts suite à la recherche fondamentale, notamment pour les transformer en technologie applicable.

Les fournisseurs ont été les principaux artisans d'innovations évolutives, comme les réacteurs de génération III/III+, les combustibles avancés, etc. Ils ne ciblent pas seulement le marché de leur pays, mais aussi le marché international des nouvelles centrales, de la rénovation, du démantèlement, etc.

La collaboration entre fournisseurs repose en général sur des accords spécifiques qui attachent une attention toute particulière aux aspects commerciaux importants, notamment les droits de propriété intellectuelle. Lorsque les commandes de centrales nucléaires sont nombreuses, la collaboration entre les fournisseurs de systèmes est bien sûr limitée par les contraintes de la concurrence sur le marché. Au cours des longues années de stagnation, plusieurs restructurations et fusions chez les fournisseurs nucléaires ont malgré tout conduit à la mise en commun de connaissances technologiques à grande échelle.

Tableau 5.3 Principaux fournisseurs du secteur nucléaire dans les pays participants

Pays	Conception de l'îlot nucléaire	Centrale (clés en mains)	Composants	Combustible	Retraitement	Gestion des déchets	Service
Belgique	Tractebel Engineering	-	-	Belgonucléaire	-	ONDRAF/NIRAS	Tractebel Engineering, Belgatom
Canada	EACL	EACL		Cameco/CGE	-	SGDN	-
Espagne	-	-	ENSA	ENUSA	-	ENRESA	TECNATOM, IBERINCO, SOLUZIONA
États-Unis	Westinghouse, GE, GA, B&W	Westinghouse, GE, GA, B&W	-	-	-	-	-
Finlande	-	-	-	-	-	Posiva	FNS, VTT, TVO Nuclear Services Oy, Francom Oy
France	AREVA NP	AREVA NP	-	AREVA NC	AREVA NC (Cogema)	ANDRA	-
Japon	Mitsubishi, Toshiba, Hitachi	Mitsubishi, Toshiba, Hitachi	Mitsubishi, Toshiba, Hitachi, Ishikawajima-Harima	Mitsubishi Nuclear Fuel Co., Ltd, Global Nuclear Fuel-Japan Co Ltd, Nuclear Fuel Industries	JNFL	NUMO (déchets de haute activité) JNFL (déchets de faible activité)	Mitsubishi, Toshiba, Hitachi
République de Corée	KOPEC	KHNP (gestion de projets)	Doojung	KNFC	-	NETEC	KPS
République tchèque	NRI-Div. Energo- projekt, SKODA Praha	SKODA Praha	SKODA JS	-	-	NRI, SKODA JS	SKODA JS
Suisse	-	-	CCI, Alstom, ABB	-	-	Nagra	Colenco

Note : les acronymes sont développés dans l'annexe B.

5.3.2.4 Fournisseurs d'énergie

Les fournisseurs d'énergie sont les principaux clients de systèmes énergétiques, sur qui porte l'innovation nucléaire. Ils regroupent les compagnies d'électricité (voir tableau 5.4), mais aussi les fournisseurs de chaleur, parmi lesquels les entreprises de chauffage urbain, les futurs fournisseurs d'hydrogène, et les fournisseurs d'eau potable.

Tableau 5.4 Principales compagnies d'électricité nucléaire dans les pays participants

Pays	Compagnies d'électricité ¹	Marché de l'électricité ²	Puissance nucléaire installée (en Gwe nets) ³	Production d'électricité d'origine nucléaire (en TWh nets, 2005)	Part du nucléaire (% , 2005)
Belgique	ELECTRABEL	PD	5.8	45.3	55.0
Canada	OPG, Bruce Power, HQ, NB Power	R	12.5	86.0	14.4
Espagne	Endesa, Iberdrola, Unión Fenosa, Hidrocantabrico (association UNESA)	D	7.5	55.4	19.8
États-Unis		PD	99.8	780.0	19.3
Finlande	FPH, TVO	D	2.7	22.3	32.9
France	EDF	R	63.4	430.0	78.3
Japon	<ul style="list-style-type: none"> • Filière REB : Tokyo, Tohoku, Chubu, Hokuriku, Chugoku • Filière REP : Kansai, Hokkaido, Sikoku, Kyusyu • Filières REB et REP : JAPC 	PD	47.4	291.9	31.7
Rép. de Corée	KHNP	R	16.8	138.7	40.1
Rép. tchèque	CEZ	R	3.5	23.3	30.6
Suisse	BKW-FMB, AXPO, ATEL, EOS	D	3.2	22.0	37.9

1. Les entités en *italiques* sont des compagnies privées.

2. **R** : réglementé, **PD** : en partie déréglementé, **D** : déréglementé.

3. Données fin 2005. Source : AEN (2006), *Données sur l'énergie nucléaire : édition 2006*, OCDE, Paris.

Si les compagnies d'électricité sont les utilisateurs finaux des technologies nucléaires innovantes et de leurs développements, ce serait une erreur de penser qu'elles doivent pour autant assurer seules la promotion de l'innovation. Cela a peut-être été le cas par le passé, lorsque les pouvoirs publics prévoyaient dans les tarifs de l'électricité des ressources spécifiques pour la R-D, mais dans un marché libéralisé, les compagnies d'électricité achètent désormais le plus souvent les solutions « standards » que les fournisseurs proposent à leurs problèmes. Dans certains domaines particuliers toutefois, les compagnies d'électricité ont besoin de résultats de recherche de première main pour prendre les bonnes décisions, sans distorsion du marché de la technologie. Ces domaines étant généralement de caractère international – vieillissement des matériaux, accroissement de la fiabilité, etc., les s'associent généralement entre elles pour les étudier. Enfin, les compagnies d'électricité ont par ailleurs collaboré

à l'élaboration de spécifications universellement reconnues, comme le *utility requirements document* (URD)² aux États-Unis et les *European utility requirements* (EUR) en Europe.

Les compagnies d'électricité ont subi de nombreux regroupements, notamment aux États-Unis. Les grands groupes qui en résultent ont la capacité de procéder à des investissements importants et disposent des compétences de gestion, des ressources financières et de l'envergure requises pour être plus performantes. Les avantages du regroupement ressortent clairement des données de performance, lesquelles montrent que l'on obtient sur les centrales d'un parc important des facteurs de charge plus élevés et des coûts plus faibles que ceux auxquels peuvent prétendre les exploitants d'une centrale unique.

Les autres fournisseurs d'énergie, notamment les fournisseurs de chaleur, semblent jouer un rôle minime dans l'innovation nucléaire. Les fournisseurs d'hydrogène pourraient toutefois y contribuer beaucoup.

5.3.2.5 Autres organisations

Nombre d'organisations soutiennent les exécutants de la R-D, les fournisseurs de systèmes et les fournisseurs d'énergie dans le processus d'innovation. Aux États-Unis par exemple, le *Nuclear Energy Institute* (NEI) et l'*Institute of Nuclear Power Operations* (INPO) conduisent de vastes programmes d'appui à l'industrie nucléaire. Bien qu'aucun de ces instituts ne se livre à la recherche technologique, ils participent tous deux à l'évaluation des problèmes et expériences en matière de réglementation et d'exploitation, publient des rapports et cultivent des liens solides avec les agences gouvernementales, les mass médias et diverses organisations internationales. Le *Japan Atomic Industry Forum* (JAIF) et le *Korea Atomic Industry Forum* (KAIF) sont encore d'autres exemples d'organisations de ce type.

5.3.3 Cadres institutionnels

5.3.3.1 Politiques nationales

Les politiques énergétiques nationales ont une grande influence sur la motivation et l'orientation de l'innovation nucléaire. On a besoin de politiques énergétiques à long terme, qui s'inscrivent dans un cadre approprié de politiques nationales, ainsi que de règles et de principes internationaux. L'innovation s'accompagnant généralement de longs délais de mise en œuvre et d'investissements importants, la prévisibilité des politiques énergétiques nationales est indispensable. À cet égard, les modifications des politiques énergétiques lors des changements d'administrations peuvent être un obstacle à l'innovation nucléaire.

Les politiques énergétiques poursuivies diffèrent selon les pays. Ceux qui disposent de faibles ressources énergétiques comme la France, le Japon et la République de Corée ont des politiques énergétiques favorables à l'énergie nucléaire. Certains autres pays ont une politique d'abandon progressif de l'énergie nucléaire ou de non recours à cette technologie.

2. L'URD se veut un document de consensus entre les compagnies d'électricité. Les compagnies d'électricité américaines ont lancé ensemble l'URD ALWR en 1985 et l'ont terminé en 1990. Ce document couvre la centrale dans son ensemble, jusqu'à l'interface avec le réseau électrique, et forme la base d'une conception intégrée, autrement dit de l'îlot nucléaire et de la partie classique de la centrale. Pour plus de détails, voir le rapport national des États-Unis.

Les politiques nationales d'innovation dans leur ensemble servent de cadre à l'innovation nucléaire. Nombre de pays ont manifesté intérêt grandissant pour un système national d'innovation. Ainsi, comme indiqué dans l'encadré 5.4, le gouvernement de la République tchèque a lancé en 2004 la Politique nationale d'innovation, lui donnant le plus haut rang de priorité dans le pays ; cette dernière est étroitement liée avec la politique nationale pour la recherche et le développement.

Encadré 5.4 Politique nationale d'innovation lancée en 2004 en République tchèque

Objectifs : contribuer à la création d'une société hautement compétitive sur le plan économique sans nuire à la cohésion sociale.

Domaines thématiques de priorité élevée : sûreté, fiabilité et durabilité de la future filière énergétique ; société de l'information et du savoir ; qualité et sécurité de la vie ; nouveaux matériaux et technologies ; besoins de la République tchèque dans le domaine social et économique.

Domaines intersectoriels : ressources humaines ; évaluation de la recherche ; coopération internationale pour la R-D ; utilisation des résultats de R-D dans la pratique ; aspects régionaux de la R-D.

Organisations concernées : Conseil tchèque pour la R-D ; ministère de l'Éducation, de la Jeunesse et des Sports ; ministère de l'Industrie et du Commerce ; ministère de l'Environnement ; ministère de la Santé ; ministère de l'Économie locale ; ministère des Finances ; Office national de sûreté nucléaire ; Académie des sciences de la République tchèque ; association des organismes de recherche ; agence d'administration des bourses ; centres d'innovation ; agences régionales ; universités ; instituts de recherche, etc.

Source : Rapport national de la République tchèque.

5.3.3.2 Programmes nucléaires nationaux

Dans certains pays, l'existence d'un programme nucléaire national va de pair avec l'engagement des pouvoirs publics en faveur de l'innovation nucléaire.

- Environ tous les cinq ans depuis 1956 au Japon, la Commission de l'Énergie atomique (AEC) élabore « des programmes à long terme pour la recherche, le développement et l'utilisation de la science et de l'ingénierie nucléaires ». Le dernier 9^e plan à long terme, le 9^{ème}, a été présenté en novembre 2000. Visant la période des dix prochaines années, ce nouveau programme politique a été conçu comme un « cadre de la politique énergétique nucléaire », qui précise les concepts de base de la politique énergétique nucléaire et les mesures à prendre par les pouvoirs publics concernant la R-D et l'utilisation de la science et de l'ingénierie nucléaires, ainsi que les recommandations nécessaires pour la planification et la promotion de ces mesures au niveau administratif. Ce plan exprime par ailleurs les attentes des autorités locales et des entités commerciales étroitement liées avec l'administration chargée de l'énergie nucléaire, ainsi que celles de la population à tous les niveaux, car son l'accord est indispensable à la mise en œuvre des politiques en matière d'énergie nucléaire.
- Élaboré tous les cinq ans en République de Corée sur la base du *Atomic Energy Act* (Loi sur l'énergie atomique), le *Comprehensive Nuclear Energy Promotion Plan* (CNEPP) définit les objectifs à long terme et les orientations de base de la politique nucléaire, les objectifs sectoriels, le plan budgétaire et d'investissement, etc. Intitulé « Programme national de R-D en matière d'énergie nucléaire à moyen et long termes », le programme national de recherche nucléaire a été lancé pour la première fois en 1992 en tant que programme décennal (1992-2001). Il a ensuite été modifié en un nouveau programme de R-D couvrant la période 1997-

2006 pour permettre d'évaluer les principales évolutions de la situation à l'échelon national et international. Ce programme couvre tous les secteurs du nucléaire : systèmes d'énergie nucléaire du futur, sûreté nucléaire, gestion des déchets radioactifs, radioprotection, production de radio-isotopes et applications des rayonnements, et enfin, innovation technologique dans les centrales nucléaires actuelles.

Dans certains pays comme la Finlande, la République tchèque, etc., la R-D nucléaire publique s'effectue dans le cadre de la recherche nationale en matière de science et de technologie.

5.3.3.3 Financement de l'innovation nucléaire

L'innovation nucléaire s'effectuant dans une perspective à long terme, son financement, public et privé, doit être stable à long terme, tant que les grandes étapes définies n'ont pas été atteintes. C'est ainsi que la CE reconnaît la nécessité d'investissements financiers à long terme, consciente du fait que l'industrie nucléaire doit évoluer dans un cadre qui soit :

- objectif (partage clair des responsabilités entre l'industrie et les autorités de sûreté) ;
- cohérent (traitement identique pour toutes les industries des 25 membres de l'UE) ;
- prévisible (pas d'exigences inattendues, opinion publique favorable, etc.).

Mécanisme de financement

Le budget de la R-D nucléaire provient de diverses sources, notamment des pouvoirs publics et des compagnies d'électricité, et peut suivre différents modèles. Dans certains pays, les compagnies d'électricité fournissent une partie du budget de la R-D nucléaire publique.

- En République de Corée, par exemple, la R-D nucléaire publique est financée par des dotations budgétaires et un fonds pour la R-D, auquel contribuent les compagnies d'électricité nucléaire au taux de 1 USD par MWh d'électricité produite. Au Japon, le compte spécial alimenté par la « taxe pour la promotion du développement des ressources énergétiques », prélevée sur toutes les compagnies d'électricité, constitue 70 % du budget de l'énergie nucléaire. Au Canada, le programme de R-D est financé par des dotations budgétaires et les recettes commerciales générées par EACL.
- En 1980, les pouvoirs publics espagnols ont instauré un dispositif consistant pour l'essentiel à ce que les compagnies d'électricité cèdent 0.3 % de leurs bénéfices sur la vente d'électricité pour les activités de R-D, en application de la loi ; le choix des projets bénéficiaires résulte d'une décision conjointe des pouvoirs publics et des compagnies d'électricité. Cette disposition a été prise dans un environnement très encadré, où la fourniture d'électricité était considérée comme un service public, suite à la planification des investissements et l'imposition de tarifs fixes et garantis par les pouvoirs publics. Ce schéma est resté en vigueur jusqu'en 1997, lorsque la libéralisation du secteur de l'électricité, et avec elle celle du prix de l'électricité, a conduit les pouvoirs publics à supprimer cette disposition.

Il existe également un mécanisme reposant sur le cofinancement public-privé.

- La BEI (Banque européenne d'investissement), par exemple, est habilitée dans le cadre de sa nouvelle définition de mission à soutenir la réalisation de grandes installations de recherche, notamment si elles ont un lien avec l'innovation.
- En Suisse, la loi autorise l'autorité de sûreté à imputer aux compagnies d'électricité le coût de la R-D liée aux questions réglementaires, en plus du coût ordinaire du contrôle.

- En Finlande, le financement des deux programmes nationaux de recherche nucléaire publics, à savoir le programme sur la sûreté des réacteurs nucléaires SAFIR (environ 5 millions EUR par an) et le programme KYT (recherche sur les déchets nucléaires, environ 1 million EUR par an, alors que les compagnies d'électricité sont elles-mêmes responsables de programmes bien plus importants) a été modifié depuis 2004 par la nouvelle législation et les compagnies d'électricité nucléaire ont désormais l'obligation d'assurer la plus grande part du financement. Tekes (Agence finlandaise pour le financement de la technologie et de l'innovation) est le principal organisme de financement pour la R-D et l'innovation en Finlande. Elle finance des projets industriels, ainsi que des projets conduits par des organismes de recherche, et favorise particulièrement les projets novateurs à hauts risques dans tous les secteurs technologiques, notamment celui de l'énergie nucléaire.

Il existe également des mesures de soutien à l'innovation au sein même des exécutants de la R-D. En Suisse, bien que les pouvoirs publics ne proposent aucune mesure incitative particulière en faveur de l'innovation dans le domaine de la technologie nucléaire, une approche intéressante intitulée « Actions d'amorçage » a été mise en œuvre, comme indiqué dans l'encadré 5.5.

Encadré 5.5 « Actions d'amorçage » à l'Institut Paul Scherrer en Suisse

Cette approche a été récemment mise en œuvre au sein du département Énergie nucléaire et sûreté (NES) de l'Institut Paul Scherrer. Elle consiste à financer, sur les fonds propres du département et de manière exceptionnelle des recherches limitées dans le temps (3 ans) concernant des domaines innovants. À la fin de la période prévue, les actions d'amorçage, si elles donnent satisfaction, peuvent se transformer en activités de R-D autosuffisantes. Les actions d'amorçage ont divers objectifs :

- Identifier et mettre en chantier dans les délais voulus de nouveaux domaines de recherche pouvant constituer à moyen terme des pôles de recherche pour le département et remplacer les activités de R-D censées s'achever à la même époque et, par conséquent, consolider la position du NES à la pointe de la recherche novatrice.
- Encourager l'inclination propre aux chercheurs à s'attaquer à de nouvelles questions dans des domaines de recherche innovants et à élargir ainsi leurs connaissances et leur expertise.
- Renforcer l'identité du département par le biais d'une source de financement commun et d'une concurrence ouverte et transparente.

Source : Rapport national de la Suisse.

5.3.3.4 Mesures incitatives

Aucun des pays participants n'accorde d'incitations fiscales en faveur de la R-D nucléaire. Les pouvoirs publics américains par exemple ne prévoient pratiquement aucune incitation fiscale pour les programmes de RDD-D nucléaires, ni n'accordent de subvention ou d'exonération fiscale pour le fait que l'énergie nucléaire contribue à limiter les émissions dans l'atmosphère, que ce soit pour les centrales actuelles ou la construction de nouvelles centrales. Il y a plus d'une décennie et jusqu'à très récemment, les financements fédéraux destinés à la R-D nucléaire (fission) étaient encore nettement inférieurs à ceux accordés en faveur de la R-D concernant les énergies fossiles, les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et la fusion.

Bien qu'ils ne prévoient pas d'incitations fiscales particulières en faveur de l'innovation nucléaire, la plupart des pouvoirs publics en proposent pour l'innovation technologique en général ; c'est le cas notamment de la Belgique (voir encadré 5.6), qui propose des incitations fiscales pouvant également être utilisées dans le domaine nucléaire.

Encadré 5.6 Mesures incitatives en faveur des développements technologiques en Belgique

En Belgique, la législation prévoit des incitations pour le développement technique et économique en général. Toute technologie, y compris le nucléaire, peut en bénéficier.

Pour les technologies ou les produits nouveaux, les entreprises et organes intéressés peuvent recevoir jusqu'à 80 % des coûts de développement. Cette subvention doit être remboursée lors de la commercialisation du produit ou de la technologie. Pour son concours au développement du combustible MOX, Belgonucléaire a reçu une subvention égale à 80 % des coûts engagés. Depuis, cette subvention a été entièrement remboursée. Dans les cas exceptionnels, la subvention a pu être portée à 100 %, notamment lorsque aucune commercialisation n'était envisageable dans un futur proche. Pour ses travaux de R-D sur les RNR, Belgonucléaire a également bénéficié d'une subvention de ce type.

Pour la construction de nouvelles centrales ou la remise à neuf d'installations existantes, les autorités publiques peuvent dans certaines circonstances apporter un soutien comme par exemple :

- une exonération fiscale des bénéficiaires de l'entreprise durant les premières années de l'investissement ;
- dans le cas où des prêts sont nécessaires pour financer l'investissement, les autorités publiques peuvent s'acquitter d'une partie des intérêts sur le prêt ;
- dans le cas d'un prêt, les autorités publiques peuvent donner la garantie de rembourser le prêt si l'investissement s'avère infructueux.

Dans les années 1980, l'usine de fabrication de combustible MOX de Belgonucléaire a bénéficié dans une certaine mesure de cette législation. Pour la construction de son usine de traitement des déchets de faible activité, NIRAS/ONDRAF a obtenu la garantie de l'État d'un remboursement des prêts de financement de l'installation.

Source : *Rapport national de la Belgique.*

5.3.3.5 Partenariats et réseaux

L'OCDE [24] définit le partenariat public-privé (PPP) comme un lien ou un accord formel quelconque entre des acteurs du public et du privé sur une période fixe ou indéterminée, dans le cadre duquel ils participent au processus de prise de décisions et au co-investissement de ressources limitées, notamment l'argent, le personnel, les installations et l'information, afin d'atteindre des objectifs spécifiques dans les domaines de la science, de la technologie et de l'innovation. La nécessité de partenariats et de réseaux semble bien admise dans le secteur nucléaire. De nombreux PPP existent au sein des pays participants :

- Aux États-Unis, un rapport du Conseil consultatif auprès du Secrétaire à l'Énergie sur la R-D stratégique en matière d'énergie [25] plaide fortement en faveur de PPP pour stimuler la productivité de la R-D et atteindre trois objectifs : pour renforcer par des apports privés les dépenses de R-D des pouvoirs publics ; faire intervenir les facteurs du marché dans la prise de décisions en matière de R-D ; et accélérer le processus de R-D et la transposition des résultats au niveau de l'économie et du marché. Les programmes ALWR et NP2010 sont de bons exemples de mise en œuvre de PPP aux États-Unis. Un autre exemple, le *Joint Strategic Plan (JSP)* est un document *top-down* qui tire ses objectifs de deux documents régissant la politique publiés en 2001 par l'administration et l'industrie américaines (voir encadré 5.7).

Encadré 5.7 Plan stratégique conjoint de R-D du DOE et de l'industrie électronucléaire sur les REO

Objectif : Fournir la base d'un partenariat croissant public-privé, avec des objectifs communs à l'industrie et aux pouvoirs publics pour le futur de l'énergie nucléaire.

Organisations participantes

- Le plan a été mis au point par une équipe conjointe DOE-industrie.
- Le plan a été revu et approuvé par la direction du DOE et les présidents des deux conseils consultatifs des deux grandes compagnies électronucléaires industrielles, le Conseil consultatif pour les questions de stratégie nucléaire du NEI et le Conseil pour l'énergie nucléaire de l'EPRI.

Bases du plan

- Le document de l'administration américaine intitulé *National Energy Policy* (Politique énergétique nationale), qui recommande l'expansion de l'énergie nucléaire aux États-Unis comme composant majeur de la politique énergétique nationale.
- Le document de l'industrie électronucléaire intitulé *Vision 2020*, qui demande à ce que 50 000 mégawatts de capacité de production électronucléaire soient ajoutés au réseau américain d'ici 2020 et à ce que la capacité des tranches existantes soit accrue de 10 000 mégawatts par le biais d'augmentations de puissance et d'autres mesures d'accroissement d'efficacité.

Contenu du plan

But n° 1 : construire de nouvelles centrales nucléaires

- Objectif 1-1 : faire la démonstration du système d'autorisation préalable de site et d'autorisation combinée de construction-exploitation (COL)
- Objectif 1-2 : appuyer la certification des modèles de réacteurs devant être déployés à court terme
- Objectif 1-3 : réduire les délais de mise en service des nouvelles centrales
- Objectif 1-4 : favoriser le renforcement de l'environnement commercial et de l'infrastructure industrielle pour les nouvelles centrales

But n° 2 : améliorer les performances des centrales existantes

- Objectif 2-1 : favoriser l'accroissement de la puissance installée et des facteurs de disponibilité
- Objectif 2-2 : soutenir l'exploitation prolongée des centrales à long terme
- Objectif 2-3 : mettre au point une technologie de sûreté avancée d'un bon rapport coût-efficacité
- Objectif 2-4 : favoriser la mise en œuvre de combustible à taux de combustion élevé

Application

- L'application du plan dans son intégralité est subordonnée à l'octroi de la priorité de financement appropriée par le DOE et le Congrès. La plupart des éléments du but n° 1 sont pris en compte dans le programme NP2010. Les éléments du but n° 2 sont inclus dans un programme nouvellement agréé dans la Loi sur la politique énergétique (*Energy Policy Act*) de 2005.

Source : Rapport au niveau national des États-Unis.

Les partenariats et réseaux dépassant le simple cadre nucléaire prévalent dans de nombreux pays, où ceux consacrés au seul domaine nucléaire s'inscrivent dans des partenariats et réseaux relatifs aux sciences générales et à la technologie. L'Union européenne, par exemple utilise le système des Projets intégrés en vue de « renforcer les bases scientifiques et technologiques de l'UE », et fournit ainsi un cadre aux partenariats et réseaux nucléaires en Europe.

Encadré 5.8 Projets intégrés au sein de l'Union européenne

Les projets intégrés (PI) ont pour objet de développer un savoir, des produits et des services innovants, de sorte à « renforcer les bases scientifiques et technologiques de l'Union européenne ».

Objectifs

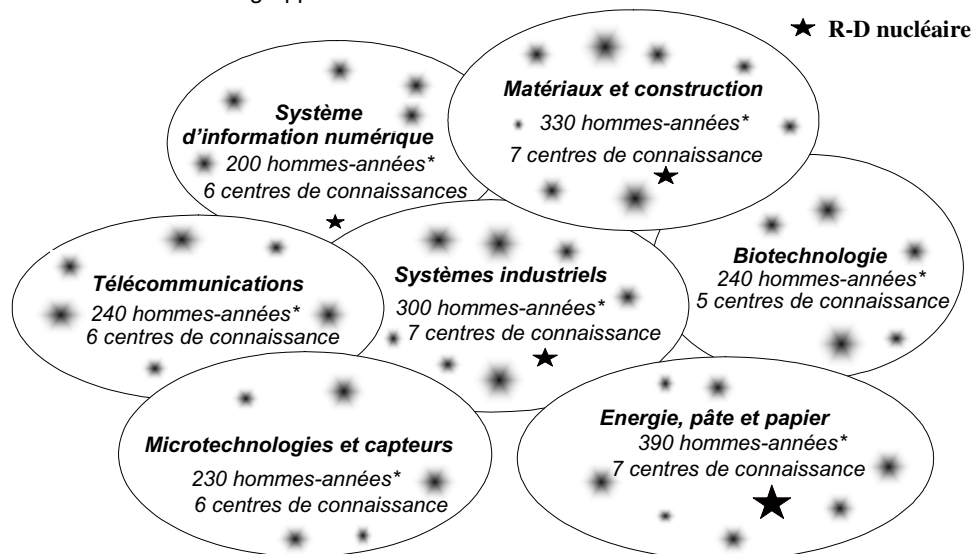
- *Intégration verticale* : 1. universités ; 2. organismes de recherche ; 3. fournisseurs de systèmes ; 4. fournisseurs d'énergie et agences de gestion des déchets ; 5. organisations de sûreté technique ou autorités de sûreté ; 6. preneurs de décisions.
- *Intégration horizontale* : 1. physique nucléaire (échelle nanométrique); 2. chimie (échelle mésoscopique); 3. mécanique des milieux continus (échelle macroscopique); 4. mathématique et informatique ; 5. électronique/électricité; 6. sciences de la santé/de l'environnement.
- *Gestion du savoir* : 1. recherche (c'est-à-dire identification, *création* et la valorisation du savoir) ; 2. enseignement (c'est-à-dire préservation, diffusion et *transmission* du savoir) ; 3. innovation (c'est-à-dire *utilisation* et exploitation du savoir pour la recherche et/ou à des fins industrielles).

Source : Rapport de l'EURATOM.

Au sein du plus grand organisme de recherche en Finlande (VTT), la R-D nucléaire est intégrée dans la grappe de savoir « Énergie, pâte et papier », comme indiqué dans l'encadré 5.9. Le centre de connaissances sur la R-D dispose ainsi d'experts de pratiquement l'ensemble des six autres grappes de savoir, notamment « Matériaux et construction » ou « Systèmes industriels ». L'idée à la base de cette configuration est de fournir un large éventail de connaissances à un domaine spécifique, avec une organisation souple.

Encadré 5.9 Grappes de savoir et centres de connaissances au sein de VTT en Finlande

7 grappes de savoir et 45 centres de connaissances



* Les données sur les hommes-années sont illustratives des besoins actuels de la recherche.

Source : Rapport national de Finlande.

5.3.3.6 Collaboration internationale

La R-D peut être encouragée et accélérée par la collaboration internationale. Cette dernière peut prendre diverses formes : collaboration de recherche entre chercheurs, collaboration fondée sur des accords entre institutions de recherche, collaboration exigeant des investissements ou des crédits de fonctionnement considérables, et enfin, collaboration destinée à créer un nouvel aménagement durable [26].

Collaboration bilatérale

On trouve de bons exemples de ce type dans les coopérations intervenues à l'échelon international dans le cadre de l'International Nuclear Energy Research Initiative (I-NERI), une initiative lancée par le DOE en 2001, en tant que mécanisme de coordination de la R-D internationale concernant les systèmes d'énergie de prochaine génération, dits de génération IV. Le programme de l'I-NERI poursuit les objectifs suivants :

- Réaliser des concepts avancés et des percées scientifiques dans la technologie de l'énergie nucléaire et des réacteurs, afin de résoudre et surmonter les principaux obstacles techniques et scientifiques à une utilisation accrue de l'énergie nucléaire dans le monde.
- Promouvoir la collaboration avec les agences internationales et les organismes de recherche, afin de renforcer le développement de l'énergie nucléaire.
- Développer et entretenir une infrastructure scientifique et technique dans le domaine nucléaire, afin de pouvoir répondre aux futurs défis techniques.

Le programme de l'I-NERI soutient une R-D innovante dans plusieurs grands domaines : technologie électronucléaire et cycle du combustible de prochaine génération ; modèles de centrales de prochaine génération, avec une efficacité plus élevée, un coût moindre, ainsi qu'une sûreté et une résistance à la prolifération renforcées ; technologies innovantes en matière de conception, fabrication, construction, exploitation, maintenance et démantèlement des centrales ; combustibles et matériaux nucléaires avancés et produits énergétiques de pointe. Des contrats bilatéraux ont été signés (dans l'ordre chronologique) avec la République de Corée, la France, l'OCDE/AEN, l'Union européenne, le Canada et le Japon.

Collaboration multilatérale

Un exemple de collaboration internationale multilatérale, GIF, axée sur l'innovation a été présenté en détail à la section 4.3.1.1.

Plus récemment, le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (Global Nuclear Energy Partnership, GNEP) a été lancé par les États-Unis en tant que stratégie globale pour d'accroître la sécurité de l'approvisionnement énergétique des États-Unis et de la planète, encourager le développement propre dans le monde, réduire le risque de prolifération nucléaire et d'œuvrer en faveur de l'environnement. Ce partenariat doit permettre d'élaborer et de faire la démonstration de nouvelles technologies résistantes à la prolifération pour le recyclage du combustible usé et la réduction des déchets nucléaires. Les États-Unis s'associeront par ailleurs aux autres nations nucléaires avancées pour mettre en place un programme de services proposant la fourniture de combustible et son retraitement à d'autres nations, en échange de leur engagement à ne développer elles même les technologies d'enrichissement ou de recyclage. Le GNEP est censé permettre aux pays en développement d'accéder en toute fiabilité à une énergie nucléaire propre, qui devrait assurer l'approvisionnement de leur population en énergie électrique de manière sûre et économique.

Les États-Unis et leurs partenaires internationaux œuvreront de concert à l'élaboration de technologies commerciales de retraitement (procédé UREX+, par exemple) qui ne génèrent pas de plutonium séparé et réduisent ainsi les problèmes de prolifération. Après les premiers résultats positifs, le GNEP prévoit la démonstration et le déploiement de réacteurs de conception avancée qui utiliseront les technologies les plus récentes pour produire de l'énergie à partir du combustible nucléaire recyclé.

Autre exemple de collaboration internationale pour la R-D, l'initiative lancée aux États-Unis en 1973 dans le cadre de l'EPRI visait à conduire et parrainer la R-D en matière de production, de transmission, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. L'EPRI offre aux producteurs d'énergie, opérateurs de systèmes de transmission et de distribution, ainsi qu'à d'autres acteurs du secteur de l'électricité, la possibilité de parrainer la R-D dans ces secteurs, pour le bien général. Ses activités de R-D nucléaire couvrent de vastes domaines, comme indiqué dans l'encadré 4.1.

Parallèlement aux efforts de ses salariés, responsables et cadres, l'EPRI sous-traite certains travaux à des instituts externes. Les résultats sont portés à la connaissance de ses membres et de ses partenaires intervenant sous contrat dans le cadre de projets spécifiques. Face à l'inquiétude croissante liée à la baisse de l'innovation technologique dans l'électronucléaire au cours de la dernière décennie, l'EPRI a institué en 2005 un nouveau bureau de l'innovation, afin de rationaliser la mise au point de technologies radicalement novatrices et d'imprimer un nouvel élan à la volonté d'innover de l'industrie.

Collaboration à travers les organisations internationales

La R-D multilatérale s'exerce également avec succès dans le cadre des organisations et instances internationales existantes.

Depuis 1958, l'AIEA passe des contrats de recherche avec des laboratoires et d'autres instituts scientifiques de ses États membres. Les activités entreprises dans ce contexte s'effectuent en règle générale dans le cadre de projets de recherche coordonnée (PRC) [27], qui conduisent les instituts de recherche de pays en développement et de pays industrialisés à collaborer sur un thème de recherche donné. L'AIEA répond parfois aussi à des instituts désireux de participer aux activités de recherche en signant avec eux des contrats hors PRC. Une petite partie des fonds disponibles sert à financer des projets particuliers portant sur des thèmes couverts par le programme scientifique de l'AIEA. Les recherches ainsi financées favorisent l'acquisition et la diffusion des nouvelles connaissances et technologies générées par l'utilisation des technologies nucléaires et des techniques isotopiques dans les divers secteurs d'activité couverts par le mandat de l'AIEA.

Les résultats sont diffusés dans les publications scientifiques et techniques de l'AIEA, ainsi que dans toute autre revue nationale ou internationale appropriée. Ils peuvent donc être librement consultés par les pays membres et la communauté scientifique internationale. Lorsque cela est possible et approprié, les connaissances acquises grâce aux PRC sont utilisées pour améliorer la qualité des projets proposés aux États membres dans le cadre du programme de coopération technique de l'AIEA.

Autre exemple de collaboration multilatérale par le biais de l'AIEA, le programme INPRO est décrit en détail dans la section 4.3.1.2.

La collaboration internationale entre les pays membres de l'UE constitue l'essence même des programmes-cadres de recherche et développement (PCRD) de cette même institution et, plus précisément pour l'énergie nucléaire, du programme-cadre de l'EURATOM. Dans les premières phases toutefois (3^e, 4^e et en partie 5^e PCRD), la R-D pratiquée dans ce cadre était plutôt axée sur des sujets limités. Au cours du 5^e PCRD, on a assisté à la mise en œuvre de réseaux – HTR-TN notamment. Ceux-ci constituent les premiers exemples d'intégration des efforts de recherche au sein de l'Union européenne.

La nouvelle tendance observée dans les activités récentes confirme le principe d'une approche intégrée, fondée sur une large coopération entre l'industrie et les institutions de recherche. L'objectif visé est de mettre au point des systèmes nucléaires complets pour un déploiement à moyen et long terme et non pas uniquement d'étudier des aspects spécifiques ou des sous-systèmes. Certains projets intégrés de l'EURATOM figurant dans le 6^e PCRD (RAPHAEL, EUROTRANS, par exemple) suivent et confirment cette philosophie.

Les projets de R-D conjoints conduits par l'AEN sous la direction de l'un de ses comités techniques sont *de jure* internationaux. La participation est large mais le champ d'application plutôt étroit. Cette R-D en collaboration a en effet pour objectifs d'étudier des phénomènes spécifiques, de réunir des données expérimentales (RASPLAV, MASCA ou SETH, par exemple) ou de faire fonctionner une grande installation pilote (HALDEN, par exemple).

La R-D sur la fusion nucléaire et plus spécialement le projet ITER³ est un exemple particulier de collaboration internationale dans le domaine nucléaire. L'idée du projet ITER a pris naissance au Sommet des grandes puissances à Genève en novembre 1985. Le Premier ministre russe M. Gorbatchev suite à ses discussions avec le Président français M. Mitterrand, a proposé au Président des États-Unis, M. Reagan, de mettre sur pied un projet international visant à développer l'énergie de fusion à des fins pacifiques. Quelque temps plus tard, le projet ITER a démarré sous la forme d'une collaboration entre l'ex-Union soviétique, les États-Unis, l'Union européenne (via EURATOM) et le Japon.

Le processus de sélection d'un site pour le projet a pris longtemps et s'est achevé en 2005⁴. Le 28 juin 2005, il a été officiellement annoncé que le réacteur ITER serait construit dans l'Union européenne, sur le site de Cadarache. Le choix d'un site a permis au projet d'évoluer vers sa phase de construction. Un accord a été conclu sur le partage des coûts et les contributions en nature des différentes parties au projet. La voie est désormais ouverte à la signature d'un accord conjoint de mise en œuvre, qui devrait permettre d'instituer légalement l'organisation internationale ITER, basée à Cadarache.

L'exemple d'ITER montre que, même dans la phase préconcurrentielle qui caractérise la R-D innovante réalisée dans le cadre de la collaboration internationale, de longues négociations peuvent s'avérer nécessaires pour concilier les priorités et les intérêts nationaux. D'un autre côté, il a démontré que la participation et l'engagement des pouvoirs publics étaient nécessaires pour que se réalise une entreprise dépassant les capacités financières et technologiques des différents pays pris séparément.

Rôle des pouvoirs publics dans la collaboration internationale

Le degré d'engagement des décideurs et des pouvoirs publics dans une collaboration internationale de ce type est à chaque fois fonction des circonstances. Au niveau le plus élémentaire, aucun engagement n'est généralement requis. Au-delà, les pouvoirs publics sont responsables du maintien d'un cadre, au sein duquel peut s'inscrire la collaboration internationale. Dans le cas d'une installation nouvelle de grande envergure, qui met en jeu des sommes importantes, l'intervention des pouvoirs

3. En latin, ITER signifie « le chemin ». Si ces lettres ont été un temps interprétées comme l'acronyme de « International Thermonuclear Experimental Reactor » (« Réacteur thermonucléaire expérimental international »), cette acception n'est plus retenue aujourd'hui.

4. Le Canada a été le premier à proposer un site à Clarington, en mai 2001. Peu après, le Japon a proposé le site de Rokkasho-Mura, l'Espagne celui de Vandellos, près de Barcelone, et la France, celui de Cadarache, dans le sud du pays. Le Canada s'est retiré de la course en 2003 et l'Union européenne a décidé en novembre 2003 de focaliser son soutien sur un site européen unique, et c'est le site français de Cadarache qui a été retenu. À compter de ce moment, les seuls candidats demeurés en lice ont été la France et le Japon.

publics est inévitable [26].

5.3.3.7 Enseignement et formation dans le domaine de l'énergie nucléaire

Les programmes universitaires en génie nucléaire sont essentiels pour l'avenir de la filière nucléaire dans le monde. Les problèmes de vieillissement du personnel dans les administrations comme dans l'industrie sont désormais indéniables et devraient s'accroître au cours de la prochaine décennie. De nombreux efforts sont accomplis à l'échelon national et international pour les résoudre.

Aux États-Unis, l'industrie et les pouvoirs publics se sont lancés dans diverses activités destinées à encourager les inscriptions aux programmes scientifiques et techniques qui fourniront les talents absolument nécessaires pour remplacer le personnel partant en retraite et répondre aux besoins d'une industrie à la veille d'une très forte expansion. Les besoins en personnel ne concernent pas que le génie nucléaire. Ils touchent aussi les ingénieurs en mécanique, en électricité ou en génie civil, ainsi que les experts dans les domaines des matériaux et de la chimie, de la radioprotection, du combustible nucléaire, des systèmes de contrôle-commande numériques, de la géophysique (conception sismique, par exemple), du contrôle des performances et de la maintenance des systèmes, de la technologie de l'information, etc.

Dans le cadre d'initiatives régionales, telles que le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (ENEN, voir encadré 5.10) ou le réseau asiatique pour l'enseignement supérieur en technologie nucléaire (*Asian Network on Education and Nuclear Training* – ANENT), des universités de différents pays se regroupent pour délivrer des diplômes dans des disciplines nucléaires qu'aucune d'entre elles ne pourrait proposer individuellement. La *World Nuclear University* (WNU) est un exemple de collaboration entre les pouvoirs publics, l'industrie et le monde universitaire en faveur de l'enseignement et de la formation. La mobilité des étudiants, des enseignants et des experts fait partie intégrante de ces initiatives.

Encadré 5.10 Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (ENEN)

En Europe, l'élaboration d'une stratégie de formation et d'enseignement dans le domaine des sciences nucléaires obéit à trois grands principes :

- Approche modulaire et critères de qualification communs (afin d'identifier les meilleurs modules d'enseignement et de formation et de leur attribuer des labels de qualité).
- Système de reconnaissance mutuelle dans toute l'Union européenne (système européen de crédits capitalisables ECTS) (« modèle de Bologne » en particulier, afin que l'excellence se généralise).
- Mobilité des enseignants et des étudiants facilitée (en particulier, grâce au financement par des PPP appropriés).

Pour atteindre ces objectifs, une association à but non lucratif (régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 relative au contrat d'association) a été formée en septembre 2003. Dénommée « *European Nuclear Education Network* » (ENEN), c'est un corollaire d'un projet du même nom dans le 5^e PCRD de l'UE. Elle comprend aujourd'hui 42 organismes d'enseignement et de formation dans le domaine nucléaire. Cette association internationale peut être considérée comme un premier pas vers la création d'une université européenne des sciences nucléaires virtuelle, laquelle pourrait à terme réunir les programmes d'enseignement et de formation dans tous les domaines de la fission nucléaire et de la radioprotection.

Source : *Rapport d'EURATOM*.

5.3.4 Infrastructure de compétences pour l'innovation

5.3.4.1 Ressources humaines

Pour mener à bien l'innovation en matière de technologie nucléaire, il est absolument essentiel de disposer d'ingénieurs et de scientifiques pluridisciplinaires, hautement motivés et qualifiés. Aussi, la disponibilité de ressources humaines a-t-elle été reconnue comme une nécessité urgente dans le secteur de l'énergie nucléaire. L'AEN a réalisé diverses études sur ce thème important et publié des rapports énonçant des recommandations à l'attention des pouvoirs publics, des autorités de sûreté, des instituts de R-D et de l'industrie. Un grand nombre d'entre elles se focalisent sur la nécessité pour les pouvoirs publics de proposer et promouvoir un enseignement axé sur les techniques et les sciences de base, notamment dans le second cycle du secondaire. Ce point est particulièrement important si l'on veut favoriser l'innovation dans le domaine de la technologie nucléaire.

Les études de cas ont permis d'identifier certains aspects particuliers concernant les ressources humaines :

- **Équilibre entre généralistes et spécialistes** : les différentes études de cas ont permis de faire le constat qu'il était nécessaire d'assurer un équilibre judicieux entre personnel hautement spécialisé et personnel pluridisciplinaire. Lorsque les structures de gestion organisationnelle requises sont bien en place, l'expérience montre que cette combinaison entraîne une fertilisation croisée des idées et des concepts, qui tend à renforcer la motivation.
- **Vieillessement du personnel et préservation du savoir** : la plupart des innovations nucléaires décrites dans les études de cas dépendent d'informations de référence, de leur compréhension et d'un savoir-faire qui n'est pas nécessairement documenté. Cela montre combien il est essentiel de préserver le savoir et de faire en sorte que des systèmes et des processus soient mis en place à cet effet pour les activités futures en matière d'innovation nucléaire. La question connexe du vieillissement du personnel concerne l'innovation nucléaire au moins à deux points de vue : d'une part, il est nécessaire de disposer d'experts chevronnés et de leur engagement dans le processus d'innovation (nombre d'entre eux fournissent un apport précieux ne serait-ce que comme « banc d'essai » d'idées et de concepts nouveaux) ; d'autre part, beaucoup pensent que l'innovation est une incitation pour de nouveaux chercheurs et ingénieurs à s'engager, car ils sont motivés par le défi qui consiste à œuvrer et contribuer à « quelque chose de nouveau ».
- **Équilibre entre anciens et nouveaux** : l'un des enseignements que l'on peut tirer des études de cas, c'est qu'il est souhaitable, dans le cadre d'une équipe dédiée à l'innovation, de faire travailler de jeunes ingénieurs et scientifiques avec certains de leurs aînés plus expérimentés. Cela permet et encourage la libre circulation des idées et des expériences, toutes deux vitales à l'innovation nucléaire.
- **Attraction de jeunes talents** : l'innovation est l'un des principaux éléments permettant d'amener les jeunes talents à contribuer aux avancées en matière de technologie nucléaire. Des programmes dynamiques d'innovation en matière de R-D, d'ingénierie, de conception et de gestion sont essentiels pour démontrer que l'énergie nucléaire se porte bien et qu'elle est une technologie d'avenir. Une industrie qui n'innove pas est morte, alors que celles qui posent des défis scientifiques et techniques attirent tout naturellement les meilleurs et les plus talentueux parmi les jeunes diplômés.

5.3.4.2 Accès à des installations et des données de R-D nucléaires à la pointe de la technologie

Aujourd'hui, avec la commercialisation de la génération actuelle des technologies nucléaires, un grand nombre des grandes installations de R-D nucléaires jadis mises en place par les pouvoirs publics doivent désormais relever les défis posés par la baisse du financement et du soutien de ces mêmes pouvoirs publics. Ce problème est aggravé par le fait que ces installations ont plus de cinquante ans et qu'elles sont nombreuses à avoir besoin d'une rénovation. De plus, dans bien des pays de l'OCDE, il manque d'installations d'irradiation spécialisées, du fait que les réacteurs de recherche à haut flux ont été démantelés et que les programmes d'irradiation des réacteurs existants sont complets de nombreuses années à l'avance. Dans ce cadre, l'AEN constitue actuellement une base de données des installations de recherche nucléaire dans les pays de l'OCDE⁵.

Même si l'on s'attend à ce que les simulations informatiques avancées jouent un rôle toujours plus important comme outil de R-D et de conception, on aura toujours besoin d'installations de R-D avancées et spécialisées. Les modèles, les codes et les simulations devront être vérifiés et testés dans le cadre du processus d'autorisation d'exploitation. D'autre part, l'existence d'installations avancées d'irradiation du combustible et d'analyse du combustible irradié, ainsi que de circuits d'essais chimiques, thermohydrauliques et des matériaux sera essentielle pour l'innovation nucléaire. Cela dit, si l'on peut disposer et utiliser en commun de telles installations, dans le cadre d'accords de collaboration (bilatéraux ou multilatéraux) adaptés, on obtient des avantages intéressants, susceptibles de favoriser et stimuler l'innovation nucléaire. C'est l'idée poursuivie, par exemple, par les projets d'installations d'irradiation hautes performances de prochaine génération en Europe, notamment avec le réacteur Jules Horowitz, MYRRHA ou le réacteur PALLAS.

5.3.4.3 Culture organisationnelle en faveur de l'innovation

La sûreté des installations ayant été reconnue comme un moteur de l'innovation dans l'industrie nucléaire, il s'est avéré tout naturel d'adopter une culture d'ouverture à l'innovation. Ainsi, le débat entre universitaires et industriels sur la thermohydraulique ou la physique nucléaire a été animé et toujours ouvert à de nouvelles idées. Les autorités de sûreté nucléaire nationales ont renforcé ce mouvement en confiant l'étude d'importantes questions de sûreté à des tiers. Cette coopération a été fructueuse à maints égards : elle a créé de nouveaux défis à relever, permettant d'attirer des individus talentueux dans ce secteur ; elle a économisé des efforts dans l'industrie en multipliant les savoir-faire mobilisés ; et elle a indéniablement augmenté le degré de sûreté des installations nucléaires.

L'ouverture a été le maître mot de la recherche nucléaire pour la mise au point des meilleurs modèles et méthodes d'analyse. Les plus importants programmes de sûreté pour l'analyse de processus nucléaires ont plus ou moins été utilisés comme des logiciels ouverts, avec une indemnisation limitée des développeurs de programmes. Illustration de ce phénomène, les problèmes standard internationaux ont constitué un moyen de s'accorder sur les meilleures pratiques en matière d'analyses calculatoires.

Toutefois, la recherche nucléaire étant très spécialisée, ses résultats ont été rendus publics essentiellement au travers des décideurs alors que la communication avec le public a été limitée. De plus, les avantages de la R-D ont été difficile à expliquer dans la mesure où ils concernent majoritairement la sûreté et n'ont que peu de retombées hors du secteur nucléaire. De ce fait, comparée à la recherche fondamentale effectuée au CERN par exemple, la recherche nucléaire rencontre plus de difficultés à être reconnue comme innovante.

5. Un groupe d'experts a été constitué en juin 2004, afin d'étudier les besoins en installations de recherche et d'expérimentation en sciences nucléaires. Il a examiné l'état de ces installations dans le monde entier et évalué les critères qu'elles devraient remplir à l'avenir dans le domaine de la science et de la technologie nucléaires.

5.3.4.4 Coopération avec d'autres secteurs

En réussissant à former une communauté internationale pour la recherche nucléaire, le secteur nucléaire est par là même devenu autosuffisant, ce qui pourrait nuire à son développement futur. Comme noté au chapitre 2, c'est entre secteurs, par l'application des connaissances existantes à un nouveau domaine, que l'on a le plus de chances d'assister à des innovations, contrairement aux améliorations le plus souvent minimales qui résultent des processus courants de R-D. La multidisciplinarité ouvre de nouvelles voies et c'est aussi aujourd'hui dans de nombreux cas un point à préciser si l'on veut obtenir des fonds pour la recherche auprès de sources telles que le Programme-cadre de l'Union européenne.

En thermohydraulique par exemple, le secteur nucléaire a bien des choses à offrir, lesquelles peuvent s'appliquer à tous les processus industriels. L'analyse probabiliste de sûreté peut elle aussi fournir des outils à d'autres secteurs industriels et leur éviter des pertes. De nombreux travaux de recherche lourds sur les nouveaux matériaux sont en cours ou prévus sous l'impulsion du nucléaire, le meilleur exemple étant ITER. Dans le même temps, le secteur nucléaire a beaucoup à gagner des techniques d'automatisation, des technologies de l'information et de la communication, etc.

Actuellement, le financement de la R-D nucléaire provient dans de nombreux cas d'une source séparée. Cette procédure est légitime, car les recherches sur la sûreté doivent être poursuivies. Toutefois, l'industrie nucléaire parvenant à maturité, la source initiale de financement pour le secteur nucléaire s'est réduite, alors que simultanément, on n'a pas trouvé d'autre source. Cette situation n'a pas été analysée, mais elle peut avoir diverses raisons, notamment le fait que les organisations habituelles de financement négligent le secteur nucléaire, car celui-ci dispose de sources directes et peut-être aussi parce que les scientifiques du nucléaire ont du mal à penser leur savoir-faire dans un champ d'application plus large. Ces points méritent une étude plus attentive. La question est de savoir comment promouvoir un débat multidisciplinaire entre le secteur nucléaire et les autres secteurs et aussi comment donner plus de place à l'innovation.

5.3.5 Gestion de programme/projet

5.3.5.1 Processus de prospective et de planification

De par sa nature, l'innovation ne peut être planifiée. Il y a trop d'incertitudes et de distorsions possibles dans ce processus pour qu'elles puissent toutes être prises en compte. Si quelqu'un décidait d'intégrer toutes les bifurcations possibles dans un processus de développement, les ressources nécessaires seraient énormes. Il convient donc de déterminer très tôt les objectifs finaux et un nombre limité de voies pour les atteindre, en s'appuyant sur l'expérience, l'intuition et le bon sens. De manière similaire, pour un bon processus de prospective, il convient de définir des étapes intermédiaires et des solutions de repli adaptées, ainsi que des limites dans le temps pour affiner le choix des voies retenues.

Compte tenu du flou inhérent au processus d'innovation et du rôle essentiel que l'expérience et le raisonnement ont à jouer, il est essentiel d'avoir la participation d'experts de diverses disciplines pour que les processus de planification et de prospective en matière de R-D innovante aboutissent et portent leurs fruits. Ces experts apportent leur expérience et les enseignements qu'ils ont tirés dans leurs domaines de compétence, identifient les problèmes délicats et posent les questions « simples » que les initiateurs de l'innovation ont tendance à oublier. De plus, ils peuvent, à un stade ultérieur, établir les liens indispensables avec d'autres disciplines, que ce soit pour une fertilisation croisée technologique ou pour l'ouverture de nouveaux secteurs de marché.

Les incertitudes évoquées ci-dessus caractérisent l'innovation dans tous les secteurs technologiques, mais elles peuvent s'accroître dans le cas de l'énergie nucléaire, à cause de son contexte social et de la question de l'acceptation par l'opinion publique. Les perspectives de son déploiement dépendent en effet aussi des avantages nets perçus par le public, pour qui la garantie d'un approvisionnement énergétique sûr et suffisant s'oppose aux peurs d'hypothétiques accidents graves aux conséquences catastrophiques.

L'attitude des pouvoirs publics face aux perspectives nationales de l'énergie nucléaire peut nettement influencer le processus de planification des innovations en matière de technologie nucléaire. Si la participation de l'industrie apporte la rigueur et le cadrage nécessaires au processus, l'implication des pouvoirs publics envoie un message de confiance dans la technologie et dans son futur, et partant, œuvre en faveur de processus de prospective innovants.

Le lancement de l'initiative Forum international Génération IV et l'élaboration de la feuille de route technologique correspondante constituent un exemple de planification et de prospective réussies. Des objectifs prioritaires et des buts spécifiques ont été convenus avec la participation des pouvoirs publics et un calendrier serré a été établi pour l'élaboration du programme. Plus d'une centaine d'idées et de concepts de systèmes nucléaires novateurs incluant les cycles du combustible ont été évalués par plus de cent experts internationaux d'environ 15 pays, de l'AEN et de l'AIEA. Ces experts étaient organisés en groupes de travail spécifiques par technologie, afin d'identifier les systèmes remplissant de manière optimale les objectifs et les critères définis au préalable.

Ensuite, les retards technologiques affectant la viabilité ou la performance de chacun des systèmes retenus ont été identifiés. La R-D nécessaire pour développer chacun de ces systèmes, ainsi que le temps et le coût approximatifs requis, ont été décrits dans le programme de développement technologique. Les résultats du programme ont ensuite été utilisés pour former la base des plans de recherche détaillée et des études de projet des diverses activités de R-D intervenant dans le cadre de chacun des systèmes.

Comme autre exemple de processus prospectif pour l'innovation nucléaire, on peut citer l'élaboration d'une stratégie européenne en faveur de technologies nucléaires innovantes dans le cadre du réseau Michelangelo (ou MICANET), réseau thématique qui s'inscrit dans le 5^e PCRD européen. En s'appuyant en grande partie sur les travaux accomplis pour le programme de développement des systèmes de génération IV, à l'élaboration duquel des spécialistes européens de la France, du Royaume-Uni et de la Suisse, ainsi que d'autres pays (via l'EURATOM) ont fortement participé, un document de prise de position stratégique a été élaboré. Celui-ci prend en compte des aspects spécifiquement européens (comme l'attitude politique par rapport à l'énergie nucléaire dans les différents pays européens, les priorités de l'industrie nucléaire européenne ou encore les capacités et les compétences de la communauté européenne en matière de R-D nucléaire) et énonce des recommandations concernant les technologies prometteuses qui devront être soutenues de manière appropriée à l'avenir par des financements publics et industriels. Les conclusions de ce document se retrouvent dans la priorité élevée accordée à la R-D nucléaire innovante en faveur de certains systèmes dans le 6^e PCRD et dans la définition des *Integrated Projects and Technology Platforms* (plateformes intégrant les projets et les technologies liées à ces systèmes) dans le 7^e PCRD. Dans le cadre du 6^e PCRD, une étude stratégique de suivi est menée dans les projets SNF-TP (*Sustainable Nuclear Fission*, coordination du CEA) et PATEROS (*Partitioning and Transmutation European Roadmap for Sustainable Nuclear Energy*, coordination du SCK•CEN).

Autre exemple à un niveau national, l'exercice d'élaboration du programme technique nucléaire [*Nuclear Technical Roadmap (NuTRM) Exercise*] en République de Corée, a été lancé en 2003, comme indiqué dans l'encadré 5.11, avec pour objectif de définir l'orientation stratégique à long terme

de la R-D nucléaire dans ce même pays ; les résultats de cet exercice seront utilisés pour formuler le programme de R-D nucléaire national à moyen et long terme.

Encadré 5.11 Exercice NuTRM (*Nuclear Technical Roadmap*) en République de Corée

Objectif : définir l'orientation de la vision à long terme, le développement stratégique et le système d'exécution liés aux activités de R-D nucléaire République de Corée.

Mission : élaborer un plan pour la R-D nucléaire et les innovations technologiques concernant les produits stratégiques à haute valeur ajoutée d'ici 2030.

La société nucléaire coréenne (*Korean Nuclear Society – KNS*) a pris le rôle d'initiative de l'exercice (2003-2005) sous l'égide de l'Institut coréen de recherche sur l'énergie atomique (KAERI) et de l'Institut coréen d'évaluation et de planification de la science et de la technologie (*Institute of Science & Technology Evaluation and Planning – KISTEP*), avec le soutien du ministère de la Science et de la Technologie (MOST). Un large panel de 221 spécialistes du nucléaire et d'autres domaines, issus des pouvoirs publics, de l'industrie, d'instituts de recherche et d'universités ont participé à l'exercice, ce qui le rend d'autant plus crédible et exploitable.

Les cinq comités de vision de haut niveau et leurs quinze sous-comités ont :

- pronostiqué les besoins futurs en matière d'énergie nucléaire ;
- défini la vision à long terme de la R-D nucléaire et de l'innovation technologique ;
- précisé la voie technologique pour réaliser des produits stratégiques innovants et les diffuser ;
- élaboré un plan efficace pour se doter des capacités nécessaires à l'innovation technologique stratégique, afin de donner corps à la vision et aux voies technologiques retenues.

Sur l'exercice, 27 technologies stratégiques ont été retenues.

Source : Rapport de République de Corée.

Aux États-Unis, le ministère de l'Énergie (DOE) a mis au point une approche globale intitulée « *Strategic Plan* », qui identifie quatre objectifs stratégiques (un pour chaque aspect de sa mission, que sont la défense, l'énergie, la science et l'environnement) et sept objectifs généraux en appui à ces mêmes objectifs stratégiques :

Mission du DOE → Objectif stratégique (25 ans) → Objectif général (10-15 ans) → Objectif de programme (10-15 ans)

Pour relier de manière concrète budget, performance et suivi, le DOE a mis en place le concept « GPRA⁶ unit ». Au sein du DOE, une unité GPRA définit une activité principale ou un groupe d'activités servant la mission centrale et affecte des ressources à des objectifs spécifiques.

5.3.5.2 Évaluation et contrôle

Il est communément admis que l'évaluation et le contrôle sont essentiels au succès des programmes d'innovation, car ces derniers comportent beaucoup d'incertitudes et de risques. Lorsqu'ils ne répondent manifestement pas à ce que l'on attend d'eux, il convient de les stopper ou de leur donner une nouvelle orientation. On a pour ce faire souvent besoin de critères bien définis.

6. *Government Performance and Results Act de 1993.*

L'évaluation et le contrôle des programmes d'innovation nucléaire prennent diverses formes : périodiques ou ponctuels, formels ou informels, internes ou externes, etc. Aux États-Unis par exemple, pour valider et vérifier les performances de ses programmes, la division nucléaire du (DOE-NE) recourt à plusieurs revues et audits du Congrès, de l'Office général de la redevabilité (*General Accountability Office*) et de nombreuses agences gouvernementales⁷. Elle assure par ailleurs de manière continue la gestion et le contrôle interne de ses programmes de recherche et développement.

Souvent, des comités permanents ou *ad hoc* sont formés pour tenir compte des avis des diverses parties intéressées par les résultats des programmes. Aux États-Unis, la DOE-NE prend avis auprès du NERAC (*Nuclear Energy Research Advisory Committee* ou Comité consultatif indépendant pour la recherche sur l'énergie nucléaire) sur l'orientation à donner aux programmes de R-D en matière d'énergie nucléaire. Le sous-comité des évaluations du NERAC, formé au cours de l'exercice 2004, a réalisé des évaluations indépendantes de divers programmes de la DOE-NE, notamment de l'initiative visant les systèmes d'énergie nucléaire de génération IV (*Generation IV Nuclear Energy Systems Initiative*), du programme électronucléaire 2010 (*Nuclear Power 2010*) et de l'initiative traitant de la fin du cycle nucléaire (*Advanced Fuel Cycle Initiative*).

Certains pays font appel à un outil spécialement développé pour l'évaluation et le contrôle. Aux États-Unis, la DOE-NE utilise le *Programme Assessment Rating Tool* (PART), un outil développé par l'OMB (équivalent de la direction du Budget) qui permet d'évaluer de manière standardisée le rendement du portefeuille des programmes fédéraux.

5.3.6 Cadre juridique de l'énergie nucléaire

5.3.6.1 Réglementation en matière de santé et de sûreté

La plupart des pays font appliquer des lois et des réglementations particulières pour garantir la sûreté de leurs installations nucléaires, en corformité avec les normes et les standards internationaux. En règle générale, la construction et l'exploitation de nouvelles installations nucléaires sont subordonnées à la délivrance d'une autorisation par l'autorité de sûreté du pays concerné. Ce processus constitue un niveau réglementaire supplémentaire pour le nucléaire par rapport à ce qui est exigé pour les autres sources de production d'électricité.

Dans ce cadre, la mise en œuvre de nouvelles technologies exige l'approbation des autorités de sûreté, notamment pour l'homologation de la conception, une procédure qui prend souvent beaucoup de temps et exige des données destinées à garantir la sûreté. Aux États-Unis par exemple, la NRC soumet toutes les nouvelles applications technologiques nucléaires à des examens complets. L'examen détaillé et la procédure de décision qui l'accompagne prennent beaucoup de temps. L'homologation des modèles ABWR et *System 80+* a demandé huit ans dans chaque cas ; celle du AP600 en a demandé quatre. On espère que la procédure sera plus rapide pour le AP1000 et l'ESBWR, car ils bénéficient nettement du fait que la NRC a déjà approuvé, sur les modèles qui les ont précédés, des caractéristiques comparables, des essais et des analyses, ainsi que l'ingénierie associée. Les homologations de modèles qui ne sont pas construits selon les réglementations, les codes et les standards américains demanderont un examen plus long, tout comme les homologations de modèles autres que les REO, pour lesquels il existe moins d'antécédents dans la réglementation américaine.

7. Ce sont notamment l'Inspecteur général du DOE, la NRC, l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis, des agences d'État pour l'environnement et la santé, la commission de sûreté des installations militaires (*Defense Nuclear Facilities Safety Board*) et l'Office de gestion de l'ingénierie et de la construction (*Office of Engineering and Construction Management*) du DOE.

5.3.6.2 *Contrôle des exportations nucléaires*

Les transferts internationaux de biens nucléaires, qui peuvent intervenir de différentes manières, sont soumis aux régimes internationaux de contrôle des exportations nucléaires. Chaque pays applique des contrôles s'inscrivant dans un cadre juridique général national, en s'attachant tout particulièrement aux objectifs suivants : [28]

- faire en sorte que les transferts de matériaux, d'équipement et de technologie nucléaires s'effectuent de manière sûre, sans risque et dans le respect de l'environnement ;
- faire en sorte que ces transferts n'aident pas directement ou indirectement un quelconque pays non doté d'armes nucléaires, ou toute personne non habilitée, à développer ou à acquérir des dispositifs nucléaires explosifs ou à utiliser des matériaux nucléaires à des fins non autorisées ;
- veiller au respect de ses obligations juridiques au regard des instruments internationaux, tels que le Traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP), les régimes internationaux de contrôle des exportations nucléaires (Comité Zangger, Groupe des fournisseurs nucléaires), la Convention de Vienne sur la protection physique des matières nucléaires, les traités régionaux de non-prolifération et les accords bilatéraux de coopération nucléaire avec d'autres pays.

Les pays exportateurs de technologie nucléaire responsables doivent exiger des garanties convenables que leurs exportations ne seront pas détournées au profit d'activités non pacifiques ou dangereuses. Les pays bénéficiaires qui ne satisfont ni ne respectent entièrement l'ensemble des traités internationaux pertinents et tous les aspects du régime de non-prolifération ne peuvent prétendre bénéficier pleinement des échanges et de la coopération nucléaires ni accéder aux produits innovants.

5.4 Principaux facteurs de performance de l'innovation nucléaire

5.4.1 *Vue d'ensemble des études de cas*

Comme indiqué au chapitre 2, la présente étude s'appuie sur des rapports nationaux et des études de cas fournis par les différents pays participants pour identifier les facteurs et les points clés de la performance en matière d'innovation nucléaire. Le tableau 5.5 donne une vue d'ensemble des études de cas, présente les promoteurs de l'innovation (ceux qui l'ont initiée ou financée), les exécutants de la R-D (ceux qui effectuent réellement les activités d'innovation), les clients potentiels (ceux qui bénéficient de l'innovation), les résultats et les principaux facteurs de réussite ou d'échec.

Tableau 5.5 Récapitulatif des études de cas

n°	Système concerné	Principaux acteurs			Résultat (situation actuelle)	Principaux facteurs
		Exécutants de la R-D	Promoteurs	Clients potentiels		
1	Combustible MOX	Groupe mixte BN- SCK•CEN	Euratom, pouvoirs publics	Compagnies d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> Belgonucléaire a produit plus de 600 tML de combustible MOX pour 23 REO dans plusieurs pays et soutenu le développement d'usines de MOX dans d'autres pays 	<ul style="list-style-type: none"> Coopération internationale Partenariat entre institut de recherche et constructeur Compétences techniques
2	MYRRHA	SCK•CEN, Euratom, GEN-IV	SCK•CEN, Euratom	SCK•CEN, groupements de compagnies d'électricité	Sélectionné comme concept de référence pour EUROTRANS	Opposition entre la recherche internationale en coopération et la recherche scientifique et développement technique à l'échelon national
3	Réacteur CANDU avancé (RCA)	EACL	EACL	Compagnies d'électricité	Projet de construction achevé	<ul style="list-style-type: none"> Compétence en R-D (main-d'œuvre, infrastructure, culture) Engagement des pouvoirs publics Impulsion de la demande du marché
4	SES-10	EACL	Pouvoirs publics	Fournisseurs de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> Réacteur de démonstration en exploitation 1987 Pas de ventes, programme annulé 	Incapacité à répondre aux exigences du marché
5	Centrale HWGCR	Constructeurs (ex-Union soviétique, République tchèque)	Pouvoirs publics	Compagnie d'électricité	1 ^{re} tranche mise en service en 1972, stoppée en 1979 suite à un accident résultant d'intervention humains	Existence d'autres technologies de qualité
6	Centrale VVER-1000	Constructeurs	Compagnie d'électricité, pouvoirs publics	Compagnie d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> 2 tranches en exploitation après 15 ans de construction 2 tranches stoppées durant la construction 	<ul style="list-style-type: none"> Décisions dictées par des considérations politiques Accident de Tchernobyl Changements radicaux de l'environnement politique et économique Inquiétude des pays voisins, notamment de leurs groupements antinucléaires
7	APS	VTT	Compagnie d'électricité, instituts de recherche	Industrie manufacturière	Multiples applications dans l'industrie manufacturière	Intérêt marqué pour le développement des TI en Finlande
8	NURES	Fortum Nuclear Services	Compagnie d'électricité	Compagnies d'électricité	De multiples produits	Niveau de connaissances élevé dans les compagnies d'électricité et les universités
9	FBR	Phénix	CEA	Pouvoirs publics	EDF	Aucun doute politique sur son utilité Recherche dédiée
		Super-phénix	CEA	Pouvoirs publics	EDF	
10	EPR	AREVA NP	EDF	EDF, compagnies d'électricité étrangères	<ul style="list-style-type: none"> Étude détaillée finalisée en 1999 1 tranche en construction en Finlande et 1 en tranche en projet en France 	<ul style="list-style-type: none"> Maturité du produit de base (REP) Recherche d'un produit industriel adapté au marché de plusieurs pays Reprise du marché nucléaire
11	Combustible MOX	Cogema	Pouvoirs publics	EDF, compagnies d'électricité étrangères	EdF charge 20 tranches de REP en combustible MOX	<ul style="list-style-type: none"> Utilité du retraitement du combustible acceptée par l'opinion publique Volonté politique Compétences en R-D

Tableau 5.5 Récapitulatif des études de cas (suite)

n°	Système concerné	Principaux acteurs			Résultat (situation actuelle)	Principaux facteurs
		Exécutants de la R-D	Promoteurs	Clients potentiels		
12	ATR	PNC, DPDC	Pouvoirs publics	Compagnies d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Prototype FUGEN en exploitation pendant 24 ans depuis 1979 • Projet de réacteur de démonstration annulé en 1995 	<ul style="list-style-type: none"> • Compétence de la technologie nationale • PPP (initiative des pouvoirs publics) • Projet basé sur les résultats de centres de R-D • Moins économique que les REO • Décision dictée par des considérations politiques
13	LWR (REO)	Compagnies d'électricité, constructeur	Compagnies d'électricité, pouvoirs publics	Compagnies d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration du facteur de charge (→70 %→75 %→80~90 %) • Baisse de 10 % du coût de construction • ABWR en exploitation en 1996 	<ul style="list-style-type: none"> • Demande des compagnies d'électricité • Amélioration des LWR existants par la technologie nationale • PPP (initiative des compagnies d'électricité) • Expérience de l'exploitation • Démarche graduelle • Plus économique que l'ATR
14	KSNP	KAERI, constructeurs, compagnie d'électricité	Compagnie d'électricité	Compagnie d'électricité	6 tranches de KSNP en exploitation, 2 tranches en construction	<ul style="list-style-type: none"> • Engagement des pouvoirs publics • Stratégie d'apprentissage de la technologie • Partenariats entre instituts de recherche, constructeurs et compagnie d'électricité
15	CANFLEX	KAERI	Pouvoirs publics	Compagnie d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Prototype testé dans un réacteur CANDU en 2003 • Pas encore de commercialisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Compétence technique • Demande de la compagnie d'électricité
16	DON	JEN	JEN	Compagnies d'électricité, instituts de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • Apparition de problèmes techniques inattendus • Abandon en 1968 	<ul style="list-style-type: none"> • Existence d'autres technologies plus adaptées • Problèmes techniques non résolus
17	Robots mobiles de maintenance et d'inspection	Compagnies d'électricité, constructeurs, CIEMAT	OCIDE, constructeurs, compagnies d'électricité	Compagnies d'électricité	<ul style="list-style-type: none"> • Prototypes mis au point, l'un d'eux a été installé pour les essais • Pas d'industrialisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de participation des constructeurs dès le début • Délai de mise en œuvre trop long • Produit de substitution sur le marché
18	SHR	PSI	Groupe de constructeurs	Fournisseurs de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> • Projet de construction et rapport préliminaire de sûreté en 1986 • Mise à l'arrêt définitive en 1990 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque compétitivité • Accident de Tchernobyl • Manque de focalisation sur un projet
19	Combustible à taux de combustion élevée	PSI, WH, Studvik,...	Compagnie d'électricité (KKL)	Compagnie d'électricité (KKL)	Utilisé dans les centrales	<ul style="list-style-type: none"> • Stratégie évolutive • Climat de confiance entre les parties intéressées
20	CRBR	National Lab	Pouvoirs publics, constructeurs	Compagnies d'électricité	Projet annulé durant la phase de démonstration	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de critères de décision clairs pour l'arrêt ou la réorientation • Absence de processus de contrôle • Décisions motivées par des considérations politiques
21	ALWR/ NP2010	Consortium de constructeurs	DOE	Compagnies d'électricité		<ul style="list-style-type: none"> • Qualité des tech. requises • Financement approprié • Bonne gestion de projet • Examens périodiques indépendants • Large consensus entre le public et l'industrie
22	EFR	ERDO, associés EFR	Euratom	EFRUG	Formulaires questions/ réponses et objectifs/ programmes	Structurer la collaboration entre la RDT et les équipes d'ingénieurs
23	PIRT	Projet EURSAFE du 5° PCRDT	Euratom	Communauté de recherche	100 phénomènes liés à la sécurité sur 1000 ont été sélectionnés	Structurer un domaine de recherche complexe

5.4.2 Évaluation des cas à partir des éléments de performance en matière d'innovation

Comme indiqué au paragraphe 2.3, vingt-trois cas ont été évalués en fonction des dix critères de mesure de la performance en matière d'innovation, décrits au paragraphe 2.3.1.

A. Demandes

La plupart des projets dictés par la demande ont abouti. Les exigences claires des fournisseurs de systèmes et des compagnies d'électricité sur les avancées souhaitées pour les REP ont été les principaux facteurs de succès. Exemples : le développement de l'EPR (cas n° 10), l'amélioration et la standardisation des REO japonais (cas n° 13) et le programme ALWR aux États-Unis (cas n° 21). La demande de localisation pour la conception et la construction de REP va dans le même sens. Exemples : le programme KSNP (*Korean Standard Nuclear Power Plant*) (cas n° 14) et le déploiement de centrales VVER-1000 (cas n° 6).

Même s'il existe un marché pour un produit innovant, les promoteurs ou les clients potentiels peuvent ne pas être très intéressés, parce qu'ils ne le connaissent pas beaucoup ou qu'ils manquent de confiance. Un engagement dès les premiers stades de l'innovation aurait pu accroître leur intérêt.

- Robots mobiles en Espagne (cas n° 17) : les problèmes de commercialisation des prototypes sont venus de ce que la fourniture de robots pour les installations nucléaires ou les services utilisant des robots n'entraient pas dans le principal secteur d'activité des partenaires industriels. Aussi, la partie marché du projet a été négligée. On a bien tenté à la fin du projet d'inclure Tecnatom, société qui proposait des services utilisant des robots. Toutefois, celle-ci n'ayant pas participé à la phase des spécifications, ces robots n'étaient pas réellement adaptés à son activité et cela n'intéressait pas vraiment Tecnatom de s'impliquer dans la vente de ces produits.

Dans certains cas, il n'y avait pas de marché pour le produit innovant. Le projet a parfois commencé par des analyses de la demande du marché sur la base de certaines hypothèses raisonnables à l'époque. Cependant, les prévisions de la demande initiale ont pu être fausses ou celle-ci trop aléatoire à prédire. De grands changements dans l'environnement ont pu se produire durant le processus d'innovation, l'accident de Tchernobyl par exemple.

- Système d'énergie *Slowpoke* au Canada (cas n° 4) : une série d'analyses poussées du marché ont été réalisées pour définir aussi bien les exigences de ce dernier que celles des utilisateurs. D'un point de vue technique, il semblait logique et rationnel de remplacer les centrales thermiques classiques par des sources de chaleur nucléaires. Bien que l'acceptation publique ait été reconnue comme une exigence fondamentale, comme la suite l'a montré, il n'a pas été possible de bien prendre en compte la sensibilité politique et publique. La réalité, c'est que le marché n'a pas accepté un concept aussi innovant que les centrales nucléaires de chauffage.
- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n°18) : dans la mesure où des réseaux de chauffage urbain à partir de centrales nucléaires étaient envisagés à l'époque du projet SHR, initié par les autorités locales (communales et cantonales), on peut penser que l'attitude générale face au chauffage urbain par le nucléaire était alors – sinon positive – du moins ouverte. Après un temps toutefois, l'effondrement des prix du pétrole ont rendu le chauffage urbain (investissements élevés pour le réseau de transport et de distribution) beaucoup moins intéressant.

Un marché existe peut-être pour le produit innovant, mais sa compétitivité n'est pas garantie. D'autres technologies de substitution peuvent s'avérer plus concurrentielles.

- Programme ATR au Japon (cas n° 12) : depuis son lancement dans les années 1960, on a assisté à un changement radical au niveau de la demande durant sa phase de développement. Dans les années 1990, l'économie du Japon est entrée dans des périodes de faible croissance et le nombre de constructions de nouveaux réacteurs nucléaires a diminué sous l'influence de problèmes et d'accidents comme Tchernobyl. Les compagnies d'électricité japonaises ont commencé à hésiter à se lancer dans des investissements lourds, suite à la déréglementation du marché de l'électricité. Elles ont alors exigé des réacteurs nucléaires plus économiques et plus fiables. L'utilisation du plutonium dans les REO devenant à cet égard plus intéressante, le programme ATR a perdu de son importance.

Dans certains cas, les pouvoirs publics ont créé la demande par des changements de politique, notamment par des achats gouvernementaux lorsqu'il existait un fort potentiel mais pas de marché.

- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : même s'il est admis que le plutonium issu du retraitement du combustible est utilisé au mieux dans les RNR, on pensait, vers la fin des années 1950, que la capacité de retraitement dépasserait les besoins des RNR et les travaux de développement ont été réorientés sur l'utilisation de plutonium dans un combustible mixte d'oxyde d'uranium et de plutonium pour les REO.
- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18) : même si les achats publics de produits innovants n'étaient pas encore bien établis à l'époque, le gouvernement fédéral appuyait la technologie nucléaire comme l'un des piliers de la fourniture d'énergie nationale et préconisait qu'on l'utilise hors du cadre traditionnel de la production d'énergie électrique. Ce message a été repris par les autorités locales, qui ont appuyé les projets de chauffage urbain par l'énergie nucléaire évoqués plus haut. Le gouvernement fédéral a d'ailleurs investi des fonds publics (limités) pour le développement de ces trois réacteurs de chauffage.

B. Ressources humaines

Dans la plupart des cas, des ressources humaines compétentes et qualifiées étaient disponibles. En règle générale, une équipe spécialisée de scientifiques et d'ingénieurs, comprenant à la fois des experts internes et des consultants externes, a été formée ; c'est le cas pour le réacteur CANDU avancé (cas n° 3) et le système d'énergie *Slowpoke* (cas n° 4) au Canada.

Cela dit, il y a également quelques cas où manquait l'expérience de la conduite de grands projets, notamment pour la conception et la construction d'une centrale nucléaire, ainsi que la connaissance des exigences associées ; c'est le cas du réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18).

L'une des manières de pallier le manque de ressources humaines consiste à constituer un groupe de travail conjoint à l'échelon national et international.

- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : un groupe de travail conjoint de l'industrie et de la recherche, le Groupe mixte Belgonucléaire-SCK•CEN a fait démarrer les laboratoires sur le plutonium dans les locaux de la SCK•CEN à Mol, en Belgique.

Dans les petits pays, la dispersion des ressources humaines entre solutions concurrentes n'est pas souhaitable, car l'innovation nucléaire exige en règle générale beaucoup de main-d'œuvre. Le cas du réacteur suisse SHR (cas n° 18) en est une illustration.

C. Ressources financières

Dans la plupart des cas, les fonds étaient suffisants mais les sources diverses – pouvoirs publics, l'organisation de recherche elle-même, l'industrie ou une combinaison des trois. Dans la plupart des cas, les pouvoirs publics ont joué un rôle déterminant comme investisseur direct (cas n^{os} 1, 4, 5, 9, 12 et 20) ou comme coordinateur des différentes sources d'investissement de l'industrie (cas n^{os} 10, 11, 13 et 14).

Cela dit, une trop grande dépendance par rapport aux investissements des pouvoirs publics, particulièrement dans la phase de démonstration de grands projets, a constitué un obstacle au succès.

- Surrégénérateur de Clinch River aux États-Unis (cas n^o 20) : il n'est pas bon que l'État fédéral soit la principale source de financement des projets destinés à démontrer l'aptitude à la commercialisation de telle ou telle technologie énergétique. Le financement devrait être assuré essentiellement par les industriels censés bénéficier de la technologie concernée. Le financement massif de mégaprojets par l'État fédéral crée une effervescence aux niveaux juridique, bureaucratique et régional chez les partisans de ces projets, à un point qui n'est ni productif ni justifié sur le plan économique, et qui contraint l'État fédéral à intervenir dans la gestion des projets.

Les compagnies d'électricité ont joué un rôle important dans le financement des projets, en tant que promoteurs avec des exigences claires (cas n^{os} 6, 10, 13, 14, 17 et 19). Les fournisseurs de systèmes ont également fourni des capitaux dans quelques cas (cas n^{os} 17, 18, 20). Cela dit, les capitaux provenant de l'industrie ont parfois été limités.

- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n^o 18) : bien que la mondialisation ait déjà fait son apparition au milieu des années 1980, les contraintes financières et la concurrence internationale n'étaient pas encore très fortes et l'industrie nationale était assez prospère financièrement. Néanmoins, les capitaux investis par l'industrie dans le développement du SHR ont été limités. De plus, ce projet a été considéré par l'industrie et les sociétés de conception et d'ingénierie comme une occasion de recevoir des capitaux publics pour leur R-D interne.

Souvent, le coût d'un projet a dépassé de loin les prévisions initiales. Quelle que soit la cause du dépassement, elle a contribué à la décision de stopper le projet.

- Réacteur surrégénérateur de Clinch River aux États-Unis (cas n^o 20) : l'escalade des coûts du CRBR s'est soldée par une controverse sans pareille ; vers la fin des années 1970 en effet, on estimait qu'il fallait 1,7 milliard USD supplémentaires au CRBR pour qu'il passe le stade de la commercialisation. Le Sénat a arrêté définitivement le projet en 1983 après que 1,6 milliard USD aient été dépensés, le coût estimé pour parvenir à son achèvement étant d'au moins 2,5 milliards USD supplémentaires.

D. Intrants physiques

Dans aucun des cas, on n'a relevé de difficultés dans l'acquisition d'intrants physiques, ce qui ne signifie pas pour autant que ce n'est pas un facteur important. Certains intrants nécessaires à la R-D, comme les matériaux nucléaires et les équipements nucléaires sensibles, sont soumis à des contrôles à l'exportation, ce qui rend parfois les transferts internationaux de tels biens impossibles ou difficiles. Le respect de la réglementation internationale sur la non-prolifération est une condition préalable indispensable à l'acquisition de ce type d'intrants.

- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : un lot de 250 g de plutonium de qualité nucléaire a été acheté au Royaume-Uni et livré en 1959. À l'époque, la réglementation internationale sur la non-prolifération n'avait pas encore pris sa forme actuelle.

E. Accès à la science, à la technologie et aux meilleures pratiques commerciales

Dans de nombreux cas, l'organisation ou le pays ont été capables de produire le savoir requis, ce qui implique un accès relativement libre et aisé au savoir existant.

- Projet de conception du réacteur CANDU avancé (cas n° 3) : ce projet a bénéficié de l'accès prioritaire à l'expertise scientifique et technique d'EACL et à ses installations de R-D. En outre, au fur et à mesure des besoins, les accords de coopération existants permettent d'organiser et de faciliter l'accès à des installations d'irradiation à l'étranger pour certaines activités comme les essais de matériaux sous irradiation. En fait, c'est l'existence de capacités de R-D et d'expertise scientifique internes qui a été le facteur essentiel du succès d'approches innovantes face aux défis posés par la conception du RCA.

Dans certains, il n'y avait pas d'autosuffisance en matière de savoir, les connaissances requises étant acquises à l'étranger, grâce à une étroite coopération internationale.

- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18) : la technologie nucléaire était considérée confidentielle à l'époque du projet SHR ; cela dit, la participation de la Suisse à la construction de centrales nucléaires suisses s'est traduite par d'intéressants contacts bilatéraux et des collaborations, et elle a donné accès au savoir technologique des grands fournisseurs nucléaires. En particulier, des échanges d'informations soutenus ont eu lieu avec l'industrie nucléaire allemande (Siemens), même sur des questions sensibles, comme la conception du combustible nucléaire.
- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : le développement initial du MOX a été conduit dans le cadre d'un accord de coopération en matière de recherche et de développement entre l'Euratom et la Commission pour l'énergie atomique aux États-Unis, et plus particulièrement le « programme d'utilisation du plutonium » du Laboratoire national d'Hanford et le programme « Saxton » de Westinghouse.

F. Capacité et propension à innover

Dans de nombreux cas ayant aboutis à un succès, le développement était fondé sur des technologies appropriées et robustes acquises lors de précédentes expériences au sein de l'organisation ou dans le pays, notamment dans le cadre d'approches évolutives.

- Réacteur EPR (cas n° 10) : l'EPR est un REP résultant des modèles les plus récents, à savoir du réacteur français de type N4, des centrales de Chooz et Civaux, et du Konvoi, le dispositif le plus récent construit en Allemagne. L'EPR a bénéficié des retours d'expérience de plus de 30 ans d'exploitation de centrales nucléaires.
- Amélioration et standardisation des REO au Japon (cas n° 13) : les compagnies d'électricité et les entreprises nucléaires industrielles ont acquis un savoir et une expérience à travers la construction et l'exploitation de REO. Dans les années 1970, la plupart des REO au Japon ont été construits grâce à la technologie nationale.

Pour les problèmes techniques non résolus, il existe en général, au moment du lancement du projet, certaines idées et perspectives sur la manière de les résoudre. Cela dit, les solutions prévues peuvent ne pas fonctionner ou le projet peut être confronté à des problèmes techniques inattendus. Le réacteur de chauffage suisse (cas n° 18) et le projet DON en Espagne (cas n° 16) sont des illustrations de ce type de cas.

Concernant les questions d'efficacité, une percée technique dont le coût est trop élevé (à cause d'exigences inutiles, par exemple) peut s'avérer dénuée de tout intérêt. L'escalade des coûts du projet durant son déroulement, comme pour le réacteur surrégénérateur de Clinch River aux États-Unis (cas n° 20), compromet grandement sa viabilité et conduit à son interruption.

Pour éviter les problèmes de délais de mise en œuvre, le produit innovant doit être livré à temps. Autrement, le projet peut perdre de sa crédibilité et ne plus être aussi compétitif face aux autres technologies. En Espagne par exemple, les robots mobiles (cas n° 17) ont exigé un délai de mise en œuvre si long que des produits de substitution étaient déjà sur le marché lorsque l'on est passé à la phase de développement.

Une solide capacité de gestion de projet est également déterminante à différents niveaux : prospective et planification, budgétisation et enfin, mise en œuvre du contrôle et de l'évaluation des performances. Avant le début du projet, l'équipe industrielle qui le propose doit présenter des estimations de coûts, de performances et de calendrier réalistes, et indiquer notamment quelle partie des coûts elle prend en charge. Ces estimations doivent être examinées par une équipe indépendante et compétente avant le début du projet. Dans le cas du réacteur surrégénérateur de Clinch River aux États-Unis (cas n° 20), le contrôle a fait défaut.

Lorsque la structure de gestion n'est pas adaptée au projet d'innovation, elle doit être corrigée et réorientée.

- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18) : en tant que centre de compétences des activités liées au SHR, l'EIR (*Eidgenössischer Institut für Reaktorforschung*, ancien institut fédéral de recherche en matière de réacteurs) n'était pas très habitué à utiliser des ressources externes pour créer des produits innovants. De plus, la R-D était axée sur la production du savoir de base nécessaire pour développer à l'échelon national les compétences requises pour exploiter les centrales suisses et peu de chose a été fait pour l'innovation interne. Avant le SHR, la R-D prospective passait généralement par la participation à de grands projets étrangers. Bien que l'EIR ait déjà connu une première restructuration avant le début du projet SHR et qu'une structure matricielle ait été introduite pour suivre la tendance générale à l'époque, on n'a pu observer aucun changement profond dans les modes de pensée et la plupart des chercheurs sont restés focalisés sur leurs disciplines bien précises et leurs objectifs traditionnels. De la même manière, des structures pas vraiment souples prédominaient parmi les partenaires industriels, ce qui a conduit plus tard à de considérables mesures de re-dimensionnement.

G. Institutions et infrastructure

À partir des années 1950, les pays les plus avancés ont mis en place leurs instituts nationaux de recherche nucléaire. Ce sont ces instituts qui ont plus tard joué le rôle essentiel d'exécutant de la R-D pour l'innovation nucléaire décrite dans les études de cas. Le SCK•CEN en Belgique (cas n° 1), l'EACL au Canada (cas n° 3 et 4), le CEA en France (cas n° 9), la PNC (aujourd'hui JAEA) au Japon (cas n° 12), le KAERI en République de Corée (cas n° 14 et 15), le NRI Rez en République tchèque et le PSI en Suisse (cas n° 18) sont des illustrations de ce type d'organismes de recherche publics.

La maturité de l'industrie nucléaire dans un pays, comme en France (cas n° 10) et au Japon (cas n° 13) est aussi un facteur déterminant pour le succès de l'innovation.

Dans certains cas, les organisations internationales, telles l'EURATOM, l'AIEA et l'AEN, ont apporté leur soutien au projet d'innovation.

- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : le retour d'information des réacteurs en exploitation, ainsi que l'échange d'informations, facilité par des organisations internationales telle que l'AIEA et l'AEN, sont importants dans le processus d'amélioration permanente.
- Projet de conception du réacteur CANDU avancé (cas n° 3) : les principaux réseaux de transmission des informations sur les besoins du marché et les approches innovantes en matière de conception résultent de retours d'informations sur l'exploitation des réacteurs de l'actuelle génération, ainsi que de l'échange d'informations, facilité par les organisations internationales existantes, notamment l'AIEA et l'AEN.
- Projet MYRRHA (cas n° 2) : le modèle de réacteur MYRRHA sert de modèle de référence au dispositif de transmutation expérimental du projet IPEUROTRANS de l'Euratom.

H. Réseaux, collaborations et grappes

La plupart des cas de succès présentaient de solides partenariats entre pouvoirs publics, instituts de recherche et industrie. La participation des fournisseurs de systèmes en particulier était déterminante. Le combustible MOX en Belgique (cas n° 1), le programme ALWR aux États-Unis (cas n° 21), l'amélioration et la standardisation des REO au Japon (cas n° 13), le programme KSNP en République de Corée (cas n° 14) et le projet de combustible à taux de combustion élevé en Suisse (cas n° 19) sont des exemples de solides partenariats entre les différents acteurs. À l'inverse, le développement des robots mobiles en Espagne (cas n° 17) est un exemple d'exclusion des constructeurs industriels finaux du groupe de recherche.

De nombreux réseaux nationaux et internationaux ont également été utilisés pour compléter les compétences en matière d'innovation. En outre, dans certains cas, de nouveaux réseaux ont été constitués spécialement pour un projet.

- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18) : la coopération en réseau autour de projets nucléaires innovants a déjà eu lieu en Suisse dans les années 1970, avec la création de la « *Interessengemeinschaft für Nukleare Technologien – IGNT* » (Groupe d'intérêt pour les technologies nucléaires), qui réunissait pour l'essentiel les partenaires qui ont par la suite participé au projet SHR. L'établissement de réseaux et de grappes a ensuite été renforcé pour le développement des réacteurs de chauffage, le SHR en particulier.
- Projet MYRRHA (cas n° 2) : le projet MYRRHA est ancré dans le projet EUROTRANS, lequel réunit 29 parmi les acteurs scientifiques et industriels européens les plus importants du domaine, ainsi que 17 universités.
- Système d'énergie *Slowpoke* au Canada (cas n° 4) : les réseaux et collaborations ont été institués spécialement dans le but d'évaluer les marchés et de définir les besoins des utilisateurs.

I. Efficacité des mécanismes du marché

Le marché des nouvelles centrales nucléaires est prudent et n'aime pas les risques. Cela n'encourage pas la pénétration des modèles novateurs et souligne combien des approches innovantes

de nature évolutive sont nécessaires. À cet égard, l'innovation peut être considérée comme un moyen de fournir un approvisionnement sûr, fiable et économique en électricité, et de développer la technologie la plus avancée. Aussi, on peut voir l'innovation comme un moyen d'atteindre un objectif, à savoir un approvisionnement en électricité sûr, fiable et économique. Le développement du réacteur CANDU avancé (cas n° 3), le développement de l'EPR (cas n° 10), l'amélioration et la standardisation des REO au Japon (cas n° 13) et le programme ALWR aux États-Unis (cas n° 21) en sont une illustration.

Le marché, national ou international, est dans une large mesure un élément moteur de l'innovation en matière de conception de centrales nucléaires. Des approches innovantes sont de plus en plus nécessaires pour répondre aux critères d'utilisation contraignants et stimulants fixés par le marché, particulièrement en termes d'économie, de sûreté, de fiabilité et de soutien public et politique. Les grands constructeurs internationaux sont donc amenés à rivaliser, le succès étant essentiellement déterminé par l'agressivité avec laquelle chaque entreprise mène à bonne fin des solutions innovantes en vue de répondre aux demandes des utilisateurs et du marché. Ainsi, dans le programme de développement du réacteur CANDU avancé (cas n° 3), les processus de marché à l'échelon international et la concurrence ont été les principaux facteurs de stimulation de l'innovation.

Cela étant, la concurrence empêche souvent la concentration des ressources à l'échelon national, ce qui est plutôt catastrophique pour les petits pays.

- Réacteur de chauffage en Suisse (cas n° 18) : les industriels suisses se sont assez tôt partagé le marché, de sorte à ce que la concurrence nationale passe au second plan. Dans le cas des réacteurs de chauffage, les différents partenaires industriels ont même conjugué leurs efforts. La concurrence était toutefois présente par le fait que trois projets se poursuivaient en parallèle (SHR, GHR et GEYSER), ce qui a constitué un moteur efficace pour l'innovation mais aussi un lourd handicap pour un petit pays aux ressources limitées.

Dans certains cas, on a constaté une résistance du marché rendant l'entrée sur ce dernier très difficile.

- Système d'énergie *Slowpoke* au Canada (cas n° 4) : les efforts entrepris ne sont pas parvenus à vaincre la résistance du marché. Même si différentes firmes se sont lancées à l'époque dans des programmes de conception et de réalisation de réacteurs pour le chauffage urbain, la concurrence entre ces dernières n'a pas permis à ces programmes de se maintenir.

Pendant que le processus d'innovation se déroule, il arrive souvent que les principaux acteurs de la RDD-D changent, suivant le stade auquel on se trouve. Une transition harmonieuse est essentielle entre les différents stades, notamment en cas de transfert de technologie et de personnel.

- Programme ATR au Japon (cas n° 12) : le projet a été soutenu par le JAERI puis par la PNC, dans son prolongement. Les résultats de recherche du programme ATR au sein du JAERI ont été livrés à la PNC, qui a procédé au développement sur ses installations d'essais, etc. Pour la corroboration des réacteurs de démonstration, la PNC s'est entendue avec la société EPDC. Les résultats de R-D et l'expérience acquise lors de l'exploitation du réacteur FUGEN ont été pris en considération dans une étude de base du réacteur de démonstration.

J. Environnement politique

Comme indiqué au paragraphe 5.1.4, l'environnement social et politique joue un rôle déterminant dans l'innovation nucléaire. Malgré le potentiel d'innovation et de bonnes opportunités sur le marché, certains développements ont été stoppés à cause de la pression sociale et politique. Cela a été le cas du

projet VVER-1000 en République tchèque (cas n° 6). La combinaison de l'influence politique et sociale à l'échelon international (opposition internationale au nucléaire d'un côté, assistance d'experts internationaux de l'autre) et de l'influence politique et sociale à l'échelon national (bouleversements au niveau de la politique gouvernementale et de l'économie) ont entraîné dans ce cas une réduction des tranches de la centrale de Temelín, des retards dans la construction et un gonflement du budget. Cela étant, ces effets en apparence négatifs se sont finalement traduits par des résultats positifs – une centrale technologiquement remise à niveau, avec des standards de sûreté élevés résultant de la combinaison des technologies de l'Ouest et de l'Est. Certains projets innovants ont été abandonnés en phase préconcurrentielle suite à des pressions politiques, c'est le cas de la centrale Superphénix en France (cas n° 9).

À l'inverse, le développement du réacteur CANDU avancé au Canada (cas n° 3) et le programme KSNP en République de Corée (cas n° 14) constituent de bons exemples des résultats que permet d'obtenir l'engagement des décideurs politiques.

La situation de l'économie et du marché fournit un cadre à l'innovation. Les changements qui peuvent intervenir affectent grandement l'avancement des innovations.

- Développement du combustible MOX en Belgique (cas n° 1) : l'environnement commercial général en Belgique était favorable. Les décisions actuelles de non retraitement et d'abandon progressif nucléaire ne sont pas propices au développement des activités nucléaires.
- Amélioration et standardisation des REO au Japon (cas n° 13) : suite à la crise pétrolière de 1973, le mouvement visant à échapper à la dépendance du pétrole pour l'approvisionnement en énergie a débuté. Le nucléaire a été pressenti comme l'une des principales énergies de substitution au Japon. Entre les années 1970 et le début des années 1990, la construction de REO s'est poursuivie régulièrement et les sociétés industrielles ont pu conserver un nombre suffisant d'ingénieurs. Les résultats du développement et de l'amélioration ont par ailleurs pu être directement répercutés dans la construction et la planification des REO actuelles.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La technologie nucléaire dispose en termes d'innovations d'un potentiel considérable, nécessaire tout d'abord pour les centrales nucléaires existantes, afin de répondre aux exigences suivantes :

- Exigences constantes de maintien et renforcement de la sûreté des installations nucléaires.
- Augmentations de puissance et obtention de plus grands rendements, ce qui entraîne de plus grandes sollicitations des matériaux et des composants.
- Optimisation des coûts, à la fois au niveau de l'exploitation et du cycle du combustible.

Ce potentiel est par ailleurs particulièrement important au vu des défis à venir concernant :

- La fermeture du cycle du combustible nucléaire.
- La pénétration du marché de la chaleur par les systèmes nucléaires de quatrième génération.

L'innovation a également caractérisé l'ensemble du développement de la technologie nucléaire, sous l'impulsion de nombreux acteurs. Les retours d'information continus provenant des centrales fonctionnant bien et les enseignements tirés d'événements anormaux ont été des sources considérables d'inspiration pour l'élaboration d'approches et de solutions technologiques innovantes à travers toute l'histoire de la technologie nucléaire. Les perfectionnements technologiques et les approches de gestion innovantes ont permis d'augmenter considérablement la disponibilité et la fiabilité des centrales, de réduire l'exposition professionnelle ainsi que la probabilité d'accidents graves. Le secteur de l'énergie nucléaire a été l'un des premiers à introduire à grande échelle l'analyse probabiliste de sûreté. Les principales innovations ces toutes dernières années ont concerné l'introduction graduelle de systèmes de sûreté passive et de salles de commande à technologie numérique. Des approches innovantes ont aussi été adoptées pour améliorer en permanence les matériaux de structure et les combustibles, et aussi pour surveiller et vérifier de manière non-destructive l'état des matériaux.

Mais les approches innovantes en matière de technologie nucléaire n'ont pas toujours abouti. Certaines raisons expliquant ces développements moins réussis sont similaires à celles rencontrées dans d'autres secteurs technologiques : ce sont le manque de compétitivité par rapport à d'autres alternatives déjà présentes sur le marché, le manque de focalisation sur un projet, l'incapacité à répondre aux exigences prévalant sur le marché, l'absence de participation de l'industrie dès un stade précoce, l'absence de critères de décision clairs pour stopper ou réorienter les activités de R-D, l'absence de contrôle de l'emploi des finances publiques, ainsi que des changements radicaux de l'environnement politique et économique, ou encore l'impossibilité de transposer les résultats d'un centre de R-D à l'échelle industrielle. D'autres causes sont spécifiques au secteur nucléaire ; ce sont, par exemple, les incidences des accidents nucléaires (perte de compétitivité suite aux exigences plus sévères en matière de dispositifs de sûreté, décisions dictées par des considérations politiques), les délais de mise en œuvre trop longs, les préoccupations des pays limitrophes, etc.

L'analyse réalisée dans cette étude permet de dégager une série de recommandations pour les décideurs qui souhaitent exploiter à l'avenir le potentiel d'innovation technologique de l'énergie nucléaire.

Aspect politique

Les décideurs doivent reconnaître l'importance des questions énergétiques et prendre position concernant le recours à l'énergie nucléaire dans le bouquet énergétique de leur pays. Ils doivent promouvoir et favoriser une approche globale des systèmes d'innovation nucléaire, qui comprenne une approche innovante de la réglementation de la sûreté nucléaire, la mise en place et la maintenance des infrastructures requises, et l'instauration de relations et d'une coopération nucléaires internationales. Ils doivent informer le public sur l'énergie nucléaire de manière objective et instaurer un environnement juridique stable permettant de gérer les risques inhérents aux investissements élevés qui s'imposent. Cela suppose des politiques énergétiques à long terme s'inscrivant dans un cadre approprié de politiques nationales et de principes et règlements internationaux.

Les pouvoirs publics qui souhaitent que l'énergie nucléaire joue un rôle permanent et plus fort dans leur bouquet énergétique doivent assurer un soutien politique et financier pour le développement de systèmes d'énergie nucléaire innovants. Les pouvoirs publics doivent en particulier susciter l'innovation à chaque fois que l'on ne sait pas très bien qui (des organisations de recherche publique, des constructeurs ou des compagnies d'électricité) doit la déclencher ou si aucune entité ne semble prête à exploiter les opportunités de marché qui semblent se présenter. Le Forum international Génération IV est un exemple du rôle assumé par les pouvoirs publics pour lancer, promouvoir et favoriser la collaboration internationale en matière de R-D sur les systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération. Cette action doit être poursuivie.

Les pouvoirs publics doivent s'associer aux efforts de la communauté internationale pour faire progresser la recherche vers de nouvelles solutions pour la production d'énergie nucléaire, plus performantes que les concepts actuels. Ainsi, l'innovation peut orienter le cours de la politique à condition qu'apparaissent de nouveaux concepts résolvant les problèmes actuels.

La collaboration internationale et interdisciplinaire doit être améliorée entre ceux qui élaborent les systèmes et les composants innovants, afin de contribuer au partage des coûts, à la naissance d'idées nouvelles et à l'enrichissement mutuel. De plus, la recherche concernant les centrales nucléaires n'est pas un domaine cloisonné, elle est liée à d'autres disciplines de recherche, notamment celles concernant les centrales à combustibles fossiles et l'industrie aérospatiale. Les pouvoirs publics doivent instaurer des mesures incitatives, afin d'accroître la communication entre les secteurs technologiques et de favoriser les contacts interdisciplinaires entre ceux qui réalisent les systèmes et les composants innovants, pour contribuer à l'éclosion d'idées nouvelles et à l'enrichissement mutuel.

Prospective et planification

L'innovation a besoin d'être amorcée. La question de savoir qui prend l'initiative est un peu comme le problème de l'œuf et de la poule. Les compagnies d'électricité ne souhaitent pas investir dans des équipements de recherche qui peuvent ne pas être rentables. Les fournisseurs de systèmes ne désirent pas investir non plus dans le développement de produits dont on ne sait s'ils correspondent à une demande. Les exécutants de la R-D ne peuvent se permettre de développer seuls de nouveaux systèmes. Ils proposent des idées avancées, mais ne sont pas à même de les mettre en œuvre à une échelle industrielle. Dans certains pays (États-Unis, Finlande, France, par exemple), les pouvoirs publics ont pris des mesures proactives visant à déclencher et soutenir une R-D innovante concernant l'utilisation future de l'énergie nucléaire. Des efforts des pouvoirs publics visant à soutenir le développement de produits innovants, en coopération avec les constructeurs, doivent être envisagés dans le cadre des politiques énergétiques nationales.

Bien que les idées novatrices proviennent généralement de la base, leur concrétisation exige une initiative et une orientation fortes, s'inscrivant dans une approche globale, particulièrement dans un environnement controversé. Concernant les systèmes actuels, l'initiative doit émaner essentiellement de l'industrie ; pour les développements à long terme, l'orientation doit venir des pouvoirs publics ou des institutions publiques, tout au moins dans la phase préconcurrentielle. Enfin, pour les déploiements à moyen terme, un pilotage coordonné de l'industrie et des pouvoirs publics semble approprié, et des formes adaptées de supervision combinée de ce type doivent être définies et poursuivies.

Dans tous les programmes de R-D nucléaire, particulièrement dans ceux qui durent longtemps, les critères de réussite et les étapes intermédiaires appropriées doivent être définis très tôt, dans l'idéal avant le lancement des programmes. Les réalisations de ces derniers doivent périodiquement être soumises à examen par un organisme indépendant.

Dans ce type d'approche, les rôles respectifs des promoteurs et des exécutants de la R-D doivent être clairement définis dès le tout début : le rôle des promoteurs est de fixer les objectifs, les critères de succès et les étapes intermédiaires, d'assurer le financement requis et d'ordonner régulièrement un examen par un organisme indépendant suivant un calendrier prédéfini. Les exécutants sont tenus de suivre le calendrier convenu avec les promoteurs et de signaler en temps utile et de manière explicite les modifications nécessaires et/ou les retards. Pour chacune de ces parties, l'obtention d'une « masse critique », par le biais de programmes de collaboration appropriés, doit figurer parmi les objectifs associés à ce type particulier de recherche que constitue la recherche en matière d'énergie nucléaire (activité à long terme et qui exige beaucoup de ressources).

Stratégie de R-D

Les pouvoirs publics, les autorités de sûreté et l'industrie doivent veiller à ce que des politiques et des programmes de R-D nucléaire à court, moyen et long terme soient mis en place. Les organisations internationales peuvent fournir des plateformes pour assurer la coordination de ces politiques et programmes nationaux. Pour mettre en œuvre les structures dédiées à la R-D conduisant à des modèles, des systèmes et des composants nucléaires innovants, les organisations de recherche et leurs investisseurs doivent appliquer une stratégie s'appuyant sur une approche graduelle, comportant des solutions à moyen terme, ainsi que des produits à long terme. En effet, il ne suffit pas de se concentrer uniquement sur des solutions à long terme prometteuses, sans proposer de résultats intermédiaires, car l'on court le risque de décourager les promoteurs et les investisseurs.

Il est judicieux de commencer par explorer un large éventail de trajectoires technologiques, afin d'être sûr de ne pas passer à côté de solutions optimales. Chaque stratégie doit toutefois comporter un processus d'affinage des choix possibles à un moment prédéfini et pas trop lointain. Cela donne la possibilité de se concentrer sur les trajectoires les plus prometteuses et de tirer le meilleur parti des ressources de R-D disponibles.

Une évaluation du marché existant pour les produits envisagés doit intervenir aux premiers stades des projets de R-D à court et moyen termes, et les efforts doivent se concentrer sur les produits ayant de véritables perspectives sur le marché. Ces évaluations doivent être régulièrement actualisées.

La stratégie doit également comporter des mesures appropriées permettant de renforcer la coopération avec les secteurs de la R-D non nucléaire. Cela crée des possibilités de retombées non nucléaires pour la R-D nucléaire et d'accès à des options technologiques inédites, mises au point dans d'autres secteurs (matériaux, procédés et technologies de l'information, par exemple).

Financement et instruments de mise en œuvre

La R-D en faveur de solutions innovantes exige – tout au moins en partie et en particulier durant la phase de lancement – un financement public important. Les pouvoirs publics devraient être plus enclins à allouer des fonds à ce type de R-D s'il existe un contrôle (une surveillance) des développements et des résultats similaire à celui qui existe pour la R-D industrielle. Les pouvoirs publics devraient d'ailleurs subordonner l'affectation de fonds à la mise en place de mécanismes de contrôle appropriés. Le financement public nécessaire au début du processus d'innovation doit céder la place à un financement industriel, en passant par un PPP dans une phase intermédiaire.

Cela étant, contrairement à la pratique habituelle dans l'industrie, avec ses perspectives à court terme et ses espoirs de retours rapides sur investissement, le financement de la R-D axée sur l'innovation doit être aussi stable que possible dans une perspective à long terme. Il ne doit pas être revu tant que les étapes fixées au début et les résultats intermédiaires attendus ne sont pas atteints. Les pouvoirs publics et les investisseurs privés doivent par conséquent s'engager sur le long terme. Des contrôles rigoureux doivent toutefois être mis en place, afin de vérifier que les étapes intermédiaires sont bien atteintes et que des modifications peuvent être apportées aux objectifs finaux. Le programme sur quinze ans de la France en matière de gestion des déchets est un bon exemple d'engagement à long terme des pouvoirs publics et de l'industrie en faveur de la recherche.

Infrastructure

Les pays membres de l'AEN doivent faire face à une baisse possible des effectifs dans leurs industries nucléaires. Malgré de nombreuses initiatives dans le domaine de l'enseignement et de la formation dans le domaine nucléaire, elles ont toujours besoin de plus d'ingénieurs et de scientifiques disposant de connaissances dans ce domaine qu'il n'y a de diplômés. Cette situation est préoccupante pour l'industrie nucléaire, car la majorité des scientifiques et ingénieurs qu'elle emploie actuellement n'a déjà pas de formation spécialisée dans le nucléaire. Ces inquiétudes pourraient s'accroître dans le cas d'un déploiement à grande échelle d'applications de l'énergie nucléaire hors électricité. D'un autre côté, il semble vraisemblable que les avancées en matière de développement technologique puissent attirer de plus en plus de jeunes talents.

L'une des conditions préalables indispensables au déploiement de futures solutions innovantes, notamment dans un secteur tel que la technologie nucléaire avec ses longs délais de développement et de mise en œuvre, consiste à préserver le savoir spécifique accumulé jusqu'ici et à transmettre les informations pertinentes à la génération suivante de spécialistes.

Pour réaliser cet objectif, il est essentiel que le personnel spécialisé requis (scientifiques, ingénieurs et techniciens qualifiés) soit disponible et mobile. Cela suppose une reconnaissance mutuelle des activités d'enseignement, de formation et de R-D de diverses institutions dans différents pays. À cet effet, il est souhaitable d'instaurer un système d'accréditation, qui soit reconnu et utilisé à l'échelon mondial, ainsi qu'un mode défini d'un commun accord pour le partage des résultats obtenus par les spécialistes « itinérants », les autorisations et les conditions associées (voir aussi plus loin les suggestions de partenariats et de collaborations). L'établissement de ce cadre harmonisé doit être un objectif prioritaire des responsables de l'élaboration des politiques et des décisions en matière de R-D.

L'échange de l'expertise et du savoir existants, ainsi que le partage de l'infrastructure de R-D peuvent être nettement améliorés si l'on dispose d'un accès aisé à des informations systématiques et actualisées concernant les installations existantes, les activités de R-D en cours et les détenteurs du savoir. Des bases de données répertoriant les installations existantes et leurs capacités, les programmes

de R-D en cours avec leurs grandes étapes et les résultats attendus, ainsi qu'un « carnet d'adresses » des experts avec leur domaine de spécialisation, sont des outils appropriés à cet effet. À cet égard, les récents efforts de l'OCDE/AEN pour constituer une base de données sur les installations de recherche et de sûreté nucléaires viennent à point nommé. Ce type d'initiative requiert l'adhésion des chercheurs devant alimenter les bases de données. Ceux-ci doivent donc être convaincus que ces efforts supplémentaires sont dans leur propre intérêt, du fait qu'ils enrichissent leurs travaux et leurs installations, et qu'ils donnent des possibilités de les exploiter de manière plus rationnelle et plus large. Les instituts de recherche doivent être encouragés à remettre cette question à leur ordre du jour et à utiliser toutes les structures de collaboration existantes pour constituer ces bases et les tenir à jour.

La recherche nucléaire nécessite des ressources spécialisées aussi bien en termes de personnel que d'infrastructure. Des stratégies nationales concrètes doivent être mises en place pour valoriser et préserver les connaissances, ainsi que pour élaborer et entretenir les infrastructures requises.

Les projets internationaux de construction et d'ouverture de nouvelles infrastructures doivent être encouragés. Le partage des investissements et des coûts d'exploitation doit s'effectuer sur la base de conditions d'utilisation spécifiques. Le réacteur Halden, la plateforme d'infrastructure technologique pour la R-D nucléaire proposée dans le 6^e PCRD de l'Union européenne ou le projet du réacteur Jules Horowitz lancé par la France sont des exemples de ce type de collaboration.

Partenariats et grappes

Pour que l'innovation et la R-D associée soient fructueuses, il faut un large soutien faisant intervenir toutes les parties intéressées, c'est-à-dire les chercheurs, les développeurs et les utilisateurs potentiels. Les partenariats public-privé entre les organismes de recherche publics (ou administrés par les pouvoirs publics) et l'industrie sont d'excellentes opportunités de réaliser un rapprochement entre la volonté d'innover des chercheurs et les problèmes concrets à résoudre.

La participation de l'industrie s'accompagne généralement de possibilités et de contraintes commerciales. Les politiques responsables des activités de R-D doivent faciliter les contacts entre institutions de recherche et partenaires industriels, par exemple en mettant en place des institutions publiques appropriées, chargées de susciter et promouvoir l'innovation. Ces institutions doivent être ouvertes à toutes les technologies et ne pas exclure a priori certaines options à cause de considérations politiques. Elles doivent encourager les chercheurs à se rapprocher des industriels, tout en réduisant les risques pour ces derniers, grâce à l'apport de fonds de lancement durant les premières phases des activités de R-D en faveur de l'innovation, qui sont d'ailleurs les plus aléatoires.

Ces institutions se doivent de « former » les clients potentiels à l'innovation en leur faisant la démonstration des possibles avantages à long terme directs (autrement dit économiques) ou indirects (préservation de compétences à l'échelon national, par exemple) pouvant résulter d'initiatives innovantes sans retours directs sur investissement à court terme. À cet effet, il convient d'intégrer tous les acteurs dès le début de ces activités, afin d'assurer un flux régulier d'informations dans les deux sens et une adaptation dynamique de la R-D aux besoins actuels, tout en conservant la liberté et la flexibilité nécessaires dans la recherche.

Ces institutions peuvent aussi faire office de « comités de promotion », au sein desquels les partenaires industriels se réunissent périodiquement pour évoquer leurs besoins et leurs priorités, ainsi que leurs expériences positives et négatives concernant leur engagement dans des activités de R-D innovantes, et au sein desquels les institutions de recherche sont invitées à exposer leurs efforts, leurs succès et leurs échecs, ou encore à mettre en place de nouveaux projets de coopération prometteurs.

Pour chaque initiative de recherche, les rôles et responsabilités de toutes les parties concernées doivent être clairement définis dès le début. Pour le court et moyen terme, les utilisateurs finals de la technologie doivent préciser leurs besoins. Chercheurs et constructeurs (industrie) doivent s'efforcer d'élaborer des solutions répondant de manière appropriée à ces besoins. L'un des rôles des utilisateurs finals est donc de lancer le processus de recherche, mais c'est à l'industrie et aux centres de recherche qu'il incombe de le faire évoluer. Les développements d'applications à moyen et long terme doivent être conduits par les pouvoirs publics, de sorte à favoriser l'essor de nouvelles solutions.

Les autorités de sûreté et les compagnies d'électricité peuvent donner l'impulsion à la recherche par des modèles de financement spécifiques. Les industriels ne doivent pas considérer la R-D uniquement comme un moyen supplémentaire d'obtenir des ressources additionnelles sans se préoccuper des résultats obtenus, ils doivent au contraire affecter des fonds à la R-D pour permettre à leurs produits et services d'évoluer et d'occuper une meilleure position sur le marché dans leur domaine d'activité.

Tous les secteurs assurant la promotion de la R-D nucléaire doivent travailler de manière coordonnée. Les centres de recherche doivent se spécialiser dans des domaines spécifiques (aussi nombreux que leurs ressources le leur permettent) et la constitution de grappes à l'échelon national et international doit être favorisée. Les promoteurs de l'innovation et l'industrie doivent encourager cette spécialisation en faisant appel à des centres de recherche particuliers pour des domaines bien précis.

Enseignement et formation

Une R-D privilégiant des solutions originales aux problèmes actuels et futurs est un excellent moyen d'attirer de jeunes spécialistes. D'un côté, une recherche de ce type démontre la confiance des pouvoirs publics et de l'industrie dans le potentiel d'une certaine technologie (en l'occurrence, la technologie nucléaire) et contribue donc à garantir les perspectives nécessaires dont les jeunes ont besoin pour décider d'engager une carrière dans le nucléaire. D'un autre côté, la R-D innovante répond « naturellement » au besoin qu'ont les jeunes de s'attaquer aux futurs problèmes importants pour eux et les générations à venir, plutôt que de se cantonner à résoudre les problèmes du passé.

Les pouvoirs publics doivent non seulement faire en sorte de faciliter et promouvoir la R-D axée sur l'innovation, mais aussi s'assurer que des politiques et des programmes sont en place pour soutenir et encourager l'enseignement et la formation scientifique et technique, de sorte à contribuer au recrutement des ressources humaines nécessaires pour la mise en œuvre des systèmes d'innovation nucléaire. De leur côté, l'industrie et les compagnies d'électricité doivent, dans leur propre intérêt, saisir l'opportunité de (co)financer un enseignement spécifique au nucléaire à tous les niveaux (techniques et scientifiques).

Réglementation en matière de sûreté

Les autorités de sûreté nucléaire ont un rôle essentiel à jouer dans le cadre des technologies nucléaires innovantes. Elles doivent tout d'abord être prêtes à examiner, évaluer et enfin approuver la mise en œuvre de telles solutions technologiques. Cela suppose qu'elles soient associées en temps utile aux activités de développement, afin qu'elles puissent se familiariser avec les nouvelles technologies et élaborer les méthodes et les outils nécessaires à l'évaluation des nouveaux systèmes technologiques. Cela devrait les aider à éviter les retards inutiles dans la délivrance des autorisations, qui sont susceptibles de décourager les utilisateurs potentiels de tels systèmes.

Avec des modèles de réacteurs nettement différents des modèles actuels, comme ceux qu'étudie le Forum international Génération IV, les autorités de sûreté n'auront peut-être les connaissances requises. Chacun des six concepts et cycles du combustible étudiés constituant une technologie entièrement nouvelle pour bien des parties concernées, il est probable que les délais d'examen et les besoins en informations, essais et installations pilotes soient nettement plus importants que pour les modèles actuels. Cela pourrait poser un sérieux défi pour la diffusion commerciale des technologies innovantes concernant ces futurs modèles. [29]

Pour atténuer ce problème, un soutien important des pouvoirs publics sera probablement nécessaire pour surmonter la connaissance insuffisante des règles de sûreté. Les pouvoirs publics devront peut-être concevoir et exploiter un réacteur prototype pendant un temps suffisant pour informer et sensibiliser les autorités de sûreté et pour tester la procédure réglementaire, avant que des entreprises commerciales soient assez confiantes pour investir dans tel ou tel type de réacteur. Dans leur soutien, les pouvoirs publics doivent prévoir suffisamment de temps et de ressources, notamment pour la sensibilisation et la formation des autorités de sûreté, la modification des procédures réglementaires, afin que puisse s'instaurer un environnement dans lequel les contrôles réglementaires ne constitueront plus un obstacle à l'introduction de ces nouvelles technologies.

Un autre obstacle à l'innovation vient de ce que les normes utilisées par les constructeurs de réacteurs dans le monde en matière d'assurance qualité et de sûreté technique diffèrent suivant les pays. Cela peut empêcher un pays d'accéder aux modèles innovants élaborés dans un autre pays.

L'harmonisation des réglementations des différents pays peut élargir le marché international des produits innovants et, par suite, rendre plus intéressants aux yeux des promoteurs potentiels les projets d'activités de R-D innovantes ou élargir le cercle des institutions intéressées par la collaboration internationale. Cela est particulièrement important pour les nouvelles applications du nucléaire dans les nouveaux secteurs énergétiques, comme la chaleur industrielle, le dessalement et la production d'hydrogène, de nouveaux problèmes réglementaires étant à prévoir suite au voisinage proche entre installations traditionnelles et installations nucléaires.

La procédure réglementaire peut elle-même subir des innovations, afin de rester en phase avec les évolutions technologiques et les nouveaux programmes de planification, de construction et de gestion opérationnelle des centrales nucléaires. Des procédures standards pour l'extension de la durée de vie et les augmentations de puissance sont actuellement appliquées. Des approches réglementaires intégrant le risque ou basées sur le risque sont à l'étude. Enfin, de nouveaux programmes d'autorisation (COL ou autorisation combinée de construction et d'exploitation) sont prévus pour de nouveaux modèles dans certains pays.

Enfin, dans l'environnement actuel, la R-D innovante devrait très probablement nécessiter des efforts s'inscrivant dans le cadre d'activités de collaboration à l'échelon international. Les autorités de sûreté doivent donc insister à l'échelon national sur le respect des normes et des codes internationaux, ainsi que sur l'élaboration de normes et de codes lorsqu'ils n'existent pas encore. C'est une condition importante pour les collaborations internationales soient plus efficaces et plus réussies.

Acceptation par l'opinion publique

En général, le public désire vivement croire aux espoirs suscités par des technologies meilleures, plus sûres, plus économiques et plus durables. Les promoteurs d'innovations technologiques doivent tenir compte de cette propension et faire clairement et rapidement connaître les avantages des nouvelles technologies nucléaires. Ce faisant toutefois, ils doivent indiquer de manière particu-

lièrement claire les limites des systèmes résultants, autrement dit, ce qui ne sera jamais possible : le risque d'événements catastrophiques ne sera jamais nul – mais bien plus faible que les risques d'autres solutions et que d'autres risques techniques ou naturels ; il faudra toujours stocker les déchets nucléaires – mais moins longtemps et en moindres quantités qu'aujourd'hui ; même avec le retraitement et la surrégénération, les combustibles nucléaires resteront une source d'énergie non-renouvelable ; et malgré toutes les mesures techniques et procédurales, il existera toujours un risque de prolifération d'armes atomiques ou radioactives. Enfin, il faut éviter les promesses par trop optimistes quant à la disponibilité de ces technologies, de sorte à éviter la déception dans le grand public, la perte de crédibilité des promoteurs et l'obsolescence prématurée des systèmes d'exploitation en place.

La communication étant devenue une discipline très complexe et très élaborée, il convient de trouver des approches innovantes en la matière pour promouvoir les futurs systèmes d'énergie nucléaire, qui auront à souffrir d'anciens débats hautement polémiques sur la technologie nucléaire.

Collaboration internationale

La collaboration internationale sera déterminante pour le succès des activités de R-D innovantes dans le contexte actuel. Ce type de collaboration présente des avantages évidents : elle permet de partager les charges financières, d'optimiser l'utilisation des ressources en personnel et des installations de recherche existantes, d'éviter la duplication des efforts et d'exploiter les synergies. Elle présente aussi des avantages indirects : elle assure la mobilité des spécialistes et du savoir – suite logique de la mondialisation de l'industrie (nucléaire) – et favorise une approche réglementaire harmonisée des nouveaux systèmes nucléaires. La manière bien structurée et ciblée de conduire la R-D innovante dans le cadre du GIF est pleine de promesses et pourrait devenir un excellent exemple de bonne pratique en matière de collaboration internationale dans le secteur nucléaire.

Les pouvoirs publics et les organisations internationales doivent par conséquent encourager et faciliter la collaboration internationale en faveur de systèmes nucléaires innovants, ainsi que l'échange, entre le plus grand nombre de secteurs différents, d'informations concernant les initiatives soutenues et financées par les pouvoirs publics en matière d'innovation. Cela devrait favoriser la constitution de réseaux et la fertilisation croisée des idées, des concepts et des procédés d'innovation.

Le succès d'actions de collaboration internationale de ce type passe obligatoirement par l'établissement de règles de coopération claires et l'élaboration d'instruments de coordination. Ces derniers concernent, entre autres, les principes de R-D coordonnée (organisation des projets, planification et contrôle financier, gouvernance), l'adhésion aux codes et standards internationaux, des dispositions claires pour un transfert de technologie ultérieur et la valorisation des résultats de R-D obtenus dans un cadre international par les industries nationales (protection de la propriété intellectuelle et des droits d'utilisation, délivrance d'autorisations, etc.). Ces conditions préalables doivent être définies au sein d'instances internationales comportant des représentants des pouvoirs publics et de l'industrie.

Parmi les instruments pouvant contribuer à créer un cadre propice à la création et à la promotion d'une collaboration à l'échelon international, citons les Problèmes standards internationaux, les Programmes de recherches coordonnées et les Calculs repères. Ces instruments s'inscrivent dans le cadre d'organisations internationales, telles que l'AIEA ou l'OCDE/AEN. Étant proches des sciences fondamentales, ils sont plus faciles à gérer que les activités de développement technologique, avec les grands effectifs et investissements financiers que cela suppose. Cela dit, ils permettent des contacts et la création d'une communauté internationale – un sol fertile sur lequel des collaborations plus importantes peuvent ensuite se développer.

À un niveau plus institutionnel, l'échange d'informations mutuel et systématique concernant les programmes de R-D nationaux (par exemple, les activités s'inscrivant dans les programmes-cadres de l'Euratom ou celles de la DOE-NE (division Énergie nucléaire au sein du ministère de l'Énergie aux États-Unis) peut considérablement contribuer à sensibiliser la communauté internationale à la R-D en cours et renforcer la prédisposition des institutions de recherche, lorsqu'elles le peuvent et le désirent, à s'associer à de tels programmes de R-D. Les informations concernant les résultats obtenus et qui ne se prêtent pas encore à une demande de brevet industriel doivent être présentées à la communauté internationale, afin d'aider les autres à emprunter les voies appropriées ou de recueillir des critiques constructives sur l'approche suivie. Ces informations peuvent être fournies dans le cadre d'ateliers ouverts, pendant l'exécution des projets ou après leur achèvement. Citons pour mémoire les ateliers FISA¹, organisés par l'Euratom. Dans ce cadre, il convient que les activités de R-D innovante soient systématiquement contrôlées par des instances internationales indépendantes (l'OCDE/AEN, par exemple) et que les initiatives correspondantes des pays membres soient facilitées comme il se doit.

1. Les ateliers FISA (sûreté de la fission nucléaire), organisés deux fois par an depuis 1995, couvrent la totalité du spectre de la recherche sur la sûreté des réacteurs (autrement dit, la sûreté des réacteurs en exploitation et les concepts de sûreté évolutifs). Vous trouverez les actes de la conférence FISA-2006 en anglais (« EU Research and Training in Reactor Systems », Luxembourg, 13-16 mars 2006) à l'adresse http://cordis.europa.eu/fp6-euratom/ev_fisa2006_en.htm.

RÉFÉRENCES

- [1] Communautés européennes, Service communautaire d'information sur la recherche et le développement (2005), « Un glossaire des termes liés à l'innovation », site Web CORDIS, <http://cordis.europa.eu/itt/itt-fr/02-spec01/glossary.htm>.
- [2] Branscomb Philip et Auerswald, E. (2002), *Between Invention and Innovation: An Analysis of Funding for Early-Stage Technology Development*, préparé pour le Economic Assessment Office, Advanced Technology Program, National Institute of Standards and Technology.
- [3] EC Eurostat (2004), *Innovation in Europe: Results for the EU, Iceland and Norway – Data 1998-2001*, Luxembourg.
- [4] OCDE (2004), « Issues Paper & Background Paper – The International Conference on Innovation and Regional Development: Transition to a Knowledge-based Economy », GOV/TDPC/RD(2004)7.
- [5] Communication de la CE, Livre vert sur l'innovation COM/95/0688 FINAL.
- [6] OCDE et Eurostat (2005), « Manuel d'Oslo: Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation », 3^e édition, publication conjointe de l'OCDE et d'Eurostat.
- [7] Holdren, J.P. (1999), « Foundations of International Cooperation on Energy Innovation », chapitre 3 dans *Powerful Partnerships: The Federal Role in International Cooperation on Energy Innovation*. Washington, D.C.: Executive Office of the President of the United States.
- [8] OCDE (1999), *Gérer les systèmes nationaux d'innovation*, Paris.
- [9] OCDE (2002), « Lignes directrices pour la réalisation d'études de cas dans le domaine de l'innovation », DSTI/STP/TIP(2002)1.
- [10] OCDE (2003), « La politique de l'innovation vue sous l'angle stratégique : Méthode proposée pour l'évaluation de la politique de l'innovation et des performances », DSTI/STP/TIP(2003)4.
- [11] AIE (2004), *World Energy Outlook 2004*, (disponible en anglais et en japonais), OCDE, Paris.
- [12] AIEA (2005), *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, Vienne.
- [13] McDonald, A., Riahi, K., et Rogner, H. H. (2003), « Elaborating SRES Scenarios for Nuclear Energy », Risø International Energy Conference, Roskilde.
- [14] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2000), Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC, Cambridge (seul le résumé est en français).

- [15] OCDE (2001), *OECD Environmental Indicators towards Sustainable Development*, (disponible en anglais uniquement), Paris.
- [16] AEN (2000), *Énergie nucléaire dans une perspective de développement durable*, OCDE, Paris.
- [17] Hirschberg, S. et Dones R. (2005), « Sustainability Aspects of Current and Future Electricity Supply Systems », *Chimia*, volume 59, n° 12.
- [18] Burgherr, P., *et al.* (2004), « External costs from major accidents in non-nuclear energy chains », *Report prepared by PSI for European Commission within Project NewExt*, in : R. Friedrich *et al.*, *New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies (2004)*.
- [19] US DOE (2002), *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, Nuclear Energy Research Advisory Committee et Generation IV International Forum, GIF-002-00, Idaho Falls.
- [20] AIEA (2003), *Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles: Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)*, IAEA-TECDOC-1362.
- [21] AIEA (2004), *Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)*, IAEA-TECDOC-1434.
- [22] AEN (2004), *Produits de l'énergie nucléaire hors électricité*, OCDE, Paris, <http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2004/non-electricity-fr.html>.
- [23] AEN (2006), *Données sur l'énergie nucléaire : édition 2006*, OCDE, Paris.
- [24] OCDE (2004), « Les partenariats public/privé pour l'innovation », DSTI/STP/TIP(2004)3 (révision 1 en anglais uniquement).
- [25] US Secretary of Energy Advisory Board (1995), *Final Report on the Task Force on Strategic Energy R-D* (« Yergin Report »), Juin.
- [26] AEN (2005), *Développement des compétences dans le domaine de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.
- [27] AIEA, Département des sciences et des applications nucléaires, Activités de recherche coordonnée : <http://www-crp.iaea.org/default.asp>
- [28] Stoiber, C., Baer A., Pelzer, N. et Tonhauser W. (2003), *Manuel de droit nucléaire*, AIEA, Vienne.
- [29] AEN (2007), *Procédure d'autorisation et énergie nucléaire sur le marché libéralisé de l'électricité*, en cours de publication, OCDE, Paris.

Annexe A

LISTE DES MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS

BELGIQUE

M. Paul GOVAERTS (†) SCK•CEN
M. Frans MOONS SCK•CEN

CANADA

M. David TREGUNNO EAEL

CORÉE (RÉPUBLIQUE DE)

M. Tae Joon LEE KAERI
M. Seong Won YUN KAERI

ESPAGNE

M. Pío CARMENA SERVET CIEMAT

ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

M. Jean-Pierre SURSOCK EPRI

FINLANDE

M. Reijo MUNTHER Tekes

FRANCE

M. Pascal ANZIEU CEA

JAPON

M. Hiroyasu HIRANO JAEA

RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

M. Josef KRALOVEC NRI
M. Lubor ZEZULA NRI

SUISSE

M. Konstantin FOSKOLOS IPS

EURATOM

M. Georges VAN GOETHEM DG RDT (Commission européenne)

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Mme. Asami MIKETA (Observatrice) Département de l'énergie nucléaire

AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

M. Kwang-Seok LEE (Secrétaire) Division du développement nucléaire

Annexe B

ABRÉVIATIONS

A

ABWR	Réacteur REB de type avancé
ADS	Accelerator-driven system – Système piloté par un accélérateur (autre nom du réacteur hybride – sous-critique)
AEN	Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire
AIE	Agence internationale de l'énergie
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AFCI	Advanced Fuel Cycle Initiative
AGR	Réacteur gaz-graphite avancé
ALMR	Advanced Liquid Metal cooled Reactor
ALWR	Réacteur à eau ordinaire (REO) avancé
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
APROS	Advanced Process Simulator
AREVA	Groupe industriel fournisseur de réacteurs nucléaires, combustibles et services
ATR	Réacteur thermique avancé

B

BEI	Banque européenne d'investissement
-----	------------------------------------

C

CANDU	Canada Deutérium Uranium (filière canadienne de réacteur refroidi et modéré avec de l'eau lourde)
CE	Commission européenne
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CR	Centres de référence
CRBR	Réacteur surgénérateur de Clinch River
CRIEPI	Institut de recherche central de l'industrie électrique
CPST	Comité sur la politique scientifique et technologique (OCDE)

D

DFA	Déchets de faible activité
DFMA	Déchets faiblement et moyennement actifs
DHA	Déchets de haute activité
DOE	Department of Energy (ministère de l'Énergie aux États-Unis)
DON	Réacteur modéré à l'eau lourde sous forme de deutérium, alimenté en uranium naturel, refroidi au liquide organique
DPI	Droit de propriété intellectuelle
DUPIC	Cycle du combustible faisant appel à des REO et des réacteurs CANDU

E

EdF	Électricité de France
EFR	European Fast Reactor (réacteur rapide européen)
ELSY	European Lead-cooled System
END	Évaluation non destructive
ENUSA	Empresa Nacional del Uranio, S.A.
EPR	European pressurised reactor (réacteur à eau pressurisé européen)
EPRI	Electric Power Research Institute
ESBWR	Economic Simplified Boiling Water Reactor (réacteur à eau bouillante économique simplifié)
ESP	Early Site Permit (système d'autorisation préalable du site)
ETWG	Groupe de travail technique européen
EUR	European Utility Requirements
EURATOM	Communauté européenne de l'énergie atomique

F

FISA	Sûreté de la fission nucléaire
FP	Programme-cadre (Union européenne)

G

GA	General Atomics
GE	General Electric
Gén-IV	Génération IV
GFR	Réacteur rapide refroidi au gaz
GIF	Forum international Génération IV
GNEP	Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire
GT-MHR	Gas Turbine Modular Helium Reactor (réacteur à neutrons thermiques fonctionnant à haute température d'hélium)

H

HFP	Plateforme technologique européenne hydrogène/piles à combustible
HPLWR	High performance liquid water reactor
HTGR	High temperature gas cooled reactor ou réacteur haute température refroidi par gaz
HTTR	High temperature engineering test reactor (réacteur de recherche à haute température)
HWGCR	Heavy water-moderated gas cooled reactor

I

INPRO	Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (AIEA)
IRIS	International reactor innovative and secure (réacteur modulaire de Westinghouse)
ITER	Réacteur thermonucléaire expérimental international

J

JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute

K

KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
KAIF	Korea Atomic Industry Forum
KSNP	Korea standard nuclear power plant (réacteur nucléaire standard de la Corée)

L

LFR	Réacteur rapide à caloporteur alliage de plomb
-----	--

M

MASCA	Material Scaling (AEN)
MCCI	Melt coolability and concrete interaction (refroidissement du corium et interactions avec le béton) (AEN)
MOX	Combustible MOX (mélange d'uranium et de plutonium, sauf indication contraire)
MSR	Réacteur à sels fondus

N

NDC	Comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible
NGNP	Next Generation Nuclear Power Plant – (réacteur de nouvelle génération)
NPP	Nuclear power plant (centrales nucléaires)

NSSS Nuclear steam supply system
NTD Near-term deployment

O

OCDE Organisation de coopération et de développement économiques
OMB Office of Management and Budget
ONDRAF/ Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies/
NIRAS Nationale Instelling Voor Radioactief Afval En Verrijkte Splijtstoffen
ORI Organisation de recherche industrielle
ORP Organisme de recherche public

P

PRC Projet de recherche coordonnée (AIEA)
PBMR Réacteur modulaire à lit de boulets
PPP Partenariat public-privé
PSA Analyse probabiliste de sûreté
PUREX Plutonium uranium extraction

R

REO Réacteur à eau ordinaire
RRG Réacteur refroidi par gaz
RNR-G Réacteur rapide refroidi au gaz
REB Réacteur à eau bouillante
RNR Réacteur à neutrons rapides
RELP Réacteur à eau lourde sous pression
RCA Réacteur CANDU avancé
REP Réacteur à eau pressurisée
RDD-D Recherche, développement, démonstration et déploiement
RDT Recherche et développement technologique

S

SAM Severe accident management
SARNET Severe Accident Research Network of Excellence
SCK•CEN Studiecentrum voor Kernenergie•Centre d'étude de l'énergie nucléaire
SCWR Réacteur refroidi à l'eau supercritique
SETH Senior Group of Experts on Safety Research (SESAR) Thermal-Hydraulics (AEN)
SFR Réacteur rapide refroidi au sodium
SHR Réacteur de chauffage suisse

SMART	System Integrated Modular Advanced Reactor (Réacteur avancé modulaire intégré)
S-T	Séparation et transmutation
SNI	Système national d'innovation
SRES	Special Report on Emissions Scenarios (rapport spécial sur les scénarios d'émission)
STUK	Stäteilyturvakeskus (Autorité de sûreté nucléaire et radioactive)
SWR	SiedeWasserReaktor (réacteur à eau bouillante)

T

TI	Technologies de l'information
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TIP	Groupe de travail sur la politique de l'innovation et de la technologie (OCDE/CPST)
TNP	Traité de non-prolifération des armes nucléaires
TRU	Transuranien
TSO	Technical safety organisation

U

UE	Union européenne
UNESA	Association de compagnies d'électricité
URD	Utility Requirements Document
UREX	Uranium extraction

V

VHTR	Réacteur à très haute température
VTT	Centre de recherches techniques de Finlande
VVER	Réacteur à caloporteur et modérateur eau

W

WNA	World Nuclear Association
-----	---------------------------

Annexe C

CONTENU DES RAPPORTS AU NIVEAU NATIONAL ET INSTRUCTIONS

1. INTRODUCTION

Présentez le cadre général du rapport au niveau national, notamment les principales spécificités nationales, une vue d'ensemble du programme électronucléaire en cours et les perspectives d'avenir, les besoins globaux d'innovation nucléaire dans le pays et l'orientation de l'étude.

Indicateurs : nombre de réacteurs de puissance (en exploitation, en construction, prévus) avec leur puissance installée totale et leur production électrique ; part du nucléaire dans la production d'électricité et l'approvisionnement en énergie primaire ; part des importations d'énergie, ...

2. EXPÉRIENCE NATIONALE DU DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

2.1 Évolution de la performance en matière d'innovation nucléaire

Décrivez les expériences passées : cas de réussite/ou d'échec liées à l'innovation au service des technologies de l'énergie. Pour chaque cas, identifiez les résultats souhaités, les environnements, les ressources mises en œuvre et les résultats obtenus de manière aussi précise que possible. Les résultats seront décrits par des produits tangibles (réacteurs, combustibles, installations du cycle du combustible, par exemple) ou une capacité latente. Indiquez également dans la mesure du possible les raisons de la réussite ou de l'échec.

Exemples : reportez-vous aux cas de réussite et d'échec présentés dans l'étude bibliographique sur l'innovation.

2.2 Tendances en matière de parution de publications ou de brevets sur le nucléaire

Décrivez les tendances en matière de publications et de brevets sur le nucléaire, avec les données pertinentes. Le cas échéant, une analyse des co-publications entre organisations, comme dans le rapport de la Norvège pour l'étude de cas de l'OCDE sur les SNI dans le domaine de l'énergie, serait très utile.

Indicateurs : nombre de publications dans l'ensemble des revues de la version étendue de la base SCI ; nombre de brevets (à l'échelon national et international).

3. SYSTÈME NATIONAL D'INNOVATION ACTUEL DANS LE DOMAINE NUCLÉAIRE

3.1 Organisations compétentes, ainsi que leurs rôles et leurs relations

- Agences gouvernementales et réglementaires, instituts universitaires, organismes de recherche publics, industrie nucléaire (compagnies d'électricité, constructeurs), prestataires de services intellectuels, organisations non-gouvernementales.

Décrivez les organisations pouvant avoir un lien avec l'innovation dans le domaine nucléaire. Dans votre description, vous pouvez indiquer leurs missions, leurs rôles et activités, leur histoire et leur situation actuelle, leur capacité et d'autres caractéristiques importantes pour l'innovation nucléaire. Vous pouvez également préciser les relations entre ces organisations. Pour en donner une vue globale, utilisez des tableaux et/ou des figures.

Indicateurs : nombre de salariés (diplômés) ; budget annuel ; nombre et taille des sociétés de capital-risque.

3.2 Politiques connexes des pouvoirs publics et infrastructure

- Mesures incitatives des pouvoirs publics : programme national de recherche, développement, démonstration et déploiement (RDD-D), subventions, crédits d'impôt, achats publics...

Décrivez les mesures incitatives des pouvoirs publics en faveur de l'innovation nucléaire, notamment les programmes nationaux

- Dépenses en capital : fonds publics pour la RDD-D, capital-risque, ...

Décrivez les mécanismes de financement de la RDD-D nucléaire.

Indicateurs : dépenses publiques pour la R-D dans le domaine nucléaire ; dépenses de R-D des entreprises ; capital-risque investi dans le domaine nucléaire.

- Partenariats public-privé

Décrivez tous les types de partenariats entre secteur public et industrie au service de la RD-D, notamment le réseau public-privé, les projets cofinancés, les grappes, etc. Veuillez vous référer à la description des partenariats public-privé dans l'étude bibliographique.

- Exigences réglementaires

Décrivez les procédures réglementaires et les exigences à respecter pour l'introduction de nouveaux produits ou procédés. Veuillez vous référer à la description des réglementations dans l'étude bibliographique.

Indicateurs : durée moyenne pour obtenir l'autorisation d'exploiter un nouveau produit ou procédé ; part des mises en conformité.

- Gestion des droits de propriété intellectuelle

Décrivez les réglementations et les pratiques en matière de gestion des droits de propriété intellectuelle.

- Divers

Décrivez les autres sujets qui pourraient être importants.

3.3 Processus actuels de RD-D

- Gestion de la RD-D nucléaire (prospective, sélection/exécution/évaluation des projets, etc.),

Indiquez comment sont gérés les programmes de RD-D nucléaire, notamment les processus de planification, de sélection, d'exécution et d'évaluation.

- Sources de connaissances, liens avec d'autres secteurs, mobilité des ressources humaines

Décrivez les pratiques courantes pour la création, la diffusion et l'exploitation des connaissances dans la RD-D nucléaire.

- Divers

4. FUTURS PROGRAMMES NATIONAUX D'INNOVATION

4.1 Programmes de soutien aux centrales et installations du cycle du combustible actuelles

Présentez et décrivez dans ce chapitre et les deux chapitres suivants les programmes de RD-D en cours ou les secteurs de l'industrie dans lesquels l'innovation est nécessaire.

- Éléments moteurs et facteurs limitatifs

Décrivez les environnements nationaux actuels et futurs susceptibles de favoriser et/ou défavoriser le programme. Dans la description, identifiez les éléments moteurs de l'innovation nucléaire (demande des consommateurs, compétitivité économique, politiques des pouvoirs publics en faveur de la sûreté de l'approvisionnement énergétique et de la protection de l'environnement, pressions sociales en faveur d'exigences plus strictes en matière de sûreté, exigences réglementaires) et les facteurs limitatifs (faible demande des consommateurs, acceptation publique, exigences réglementaires, manque d'intérêt dans l'industrie).

- Objectifs du programme
- Budget prévisionnel et financement
- Calendrier
- Collaborations entre les différents acteurs (nationaux et internationaux)
- Politiques institutionnelles et réglementations

4.2 Élaboration de nouveaux concepts

Comme en 4.1

4.3 Autres programmes hors production d'électricité

Comme en 4.1

5. CONCLUSION

- Résumé
- Possibilités d'amélioration

Examinez les possibilités d'amélioration des systèmes d'innovation actuels à l'échelle nationale.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(66 2007 01 2 P) ISBN 978-92-64-00662-1 – n° 55510 2007