

Développement des compétences dans le domaine de l'énergie nucléaire



Développement de l'énergie nucléaire

Développement des compétences dans le domaine nucléaire

© OCDE 2004
NEA n° 5289

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

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

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

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

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

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

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 1^{er} février 1958 sous le nom d'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'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 2004

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

AVANT-PROPOS

Il y a quelques années, plusieurs études ont été menées pour analyser les préoccupations soulevées par la place de moins en moins importante occupée par l'enseignement et la formation dans le domaine de l'énergie nucléaire dans les systèmes éducatifs, faisant craindre un niveau insuffisant. L'étude de l'AEN « Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ? » concluait que faute de prendre immédiatement les mesures nécessaires, il deviendrait difficile de garantir à l'avenir la qualification adéquate des professionnels du secteur électronucléaire. Plusieurs recommandations étaient faites dans cette publication aux gouvernements, aux universités et à l'industrie pour assurer que les besoins présents en main d'œuvre hautement qualifiée soient satisfaits et que l'option nucléaire demeure ouverte dans le futur.

La présente étude est une continuation de la précédente. Elle identifie les mécanismes et les stratégies capables de promouvoir la coopération internationale dans le domaine de l'enseignement et de la R-D nucléaires. Elle vise à analyser les questions d'infrastructure de façon globale afin d'identifier les bonnes pratiques et d'aider les gouvernements à intégrer la R-D et l'enseignement dans le domaine de l'énergie nucléaire dans un contexte international. L'étude a été menée sous l'égide du Comité de l'AEN chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible en collaboration avec le Comité de l'AEN des sciences nucléaires.

Cette publication a été préparée par un groupe d'experts dont la liste figure en annexe 1, les experts venant d'universités, d'agences gouvernementales et d'instituts de recherche. Le rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

Remerciements

Le groupe d'experts chargé de la réalisation de l'étude tient à exprimer ses remerciements à Monsieur Chris Squire pour sa contribution à la rédaction du rapport.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	3
EXPOSÉ DE SYNTHÈSE	7
I. INTRODUCTION.....	13
II. ENSEIGNEMENT ET FORMATION	15
Introduction	15
Initiatives gouvernementales.....	15
Initiatives prises par les universités.....	18
Initiatives prises par l'industrie	20
Initiatives des instituts de recherche.....	22
Exemples de bonnes pratiques	23
III. RESSOURCES HUMAINES	25
Introduction	25
Offre et demande.....	25
Mobilité.....	29
Exemples de bonnes pratiques	30
IV. COLLABORATION INTERNATIONALE	33
Introduction.....	33
Collaboration des instituts de recherche.....	34
Collaboration des industries	36
Collaboration entre les universités	36
Exemples de bonnes pratiques	37
V. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	39
Enseignement et formation dans le domaine nucléaire.....	39
Ressources humaines	40
Recherche et développement.....	41
Collaboration internationale.....	42

Annexe 1	Membres du groupe d'experts	45
Annexe 2.	Bibliographie.....	47
Annexe 3.	Résumé des réponses à la section du questionnaire consacrée à la R-D	49
Annexe 4.	Rapports nationaux	57
	Allemagne	57
	Belgique	63
	Corée, République de.....	66
	États-Unis d'Amérique	71
	Finlande.....	77
	France	83
	Italie.....	88
	Japon.....	92
	Royaume-Uni.....	95
Annexe 5.	Questionnaire	101

EXPOSÉ DE SYNTHÈSE

Le cycle de vie de l'industrie nucléaire n'est pas différent de celui des autres industries, ni d'ailleurs de la plupart des formes d'activité humaine : naissance, croissance, maturité, déclin, renaissance et renouveau ou mort. Les industries issues du XIX^{ème} siècle, telles que le chemin de fer, l'industrie chimique ou la sidérurgie, ont accompli la totalité de leur cycle alors que les industries plus récentes, telles que l'espace, l'aéronautique et l'énergie nucléaire, n'en ont parcouru qu'une partie. La position d'un secteur industriel d'un pays dans son cycle de vie dépend du développement et des besoins économiques de ce pays. S'agissant de l'industrie nucléaire, certains pays ont atteint le stade de la maturité ; d'autres sont engagés sur la voie du déclin et se demandent s'ils doivent relancer l'activité ou y mettre un terme ; d'autres encore commencent juste la construction de nouvelles installations.

Bien que le cycle de vie puisse constituer un élément commun à toutes les activités industrielles, chacune d'entre elles possède des particularités qui la distinguent des autres. Les traits distinctifs du secteur de l'énergie nucléaire sont des durées de vie des installations très longues et l'excellence technique. Les premières centrales nucléaires étaient conçues pour fonctionner pendant trente ans ; aujourd'hui, on table sur une durée de vie de 50 à 60 ans. Lors de la fermeture d'une centrale nucléaire, le temps nécessaire pour le démantèlement et la décontamination peut égaler, voire excéder la durée d'exploitation. La totalité du cycle de vie peut s'étendre sur plus d'un siècle. L'évolution technique rapide de l'industrie n'aurait pas été possible sans une multitude de programmes de recherche et de développement de haut niveau. Grâce à ces programmes et aux liens tissés avec les universités et les instituts de recherche, l'accumulation des connaissances techniques est allée de pair avec la formation du personnel techniquement compétent pour assurer la sécurité d'exploitation de l'industrie nucléaire.

La longueur de la durée de vie des installations, conjuguée au besoin de compétences techniques, place aujourd'hui l'industrie devant un double problème : comment maintenir les qualifications et les compétences existantes pendant les cinquante années ou davantage d'exploitation d'une centrale nucléaire dans un pays où l'industrie peut être parvenue à maturité ou avoir entamé son déclin et où aucune construction nouvelle n'est envisagée dans l'immédiat, et comment développer et maintenir de nouvelles qualifications et compétences dans les domaines du démantèlement et de la gestion des déchets radioactifs qui sont considérés comme des activités « de fin de vie » et qui attirent peu de jeunes.

Ces problèmes sont aggravés par la libéralisation croissante des marchés de l'énergie à l'échelle mondiale. L'industrie nucléaire est désormais contrainte de réduire ses coûts de façon draconienne pour rivaliser avec d'autres filières aux cycles de vie technologiques différents. Dans de nombreux pays, le financement public a été considérablement réduit, voire supprimé tandis que les marges bénéficiaires des producteurs ont été laminées. Il en est résulté une baisse des prix de l'électricité, mais aussi une perte de compétences consécutive aux compressions d'effectifs destinées à diminuer les coûts salariaux, des fermetures d'installations de recherche pour réduire les dépenses d'exploitation et un recul des aides au secteur universitaire pour abaisser les charges fixes.

Au final, on constate au plan technique un ralentissement de l'innovation et une perte de compétences et de qualifications. Cependant, tous les pays ne se trouvant pas au même stade du cycle de vie de la technologie nucléaire, ils ne sont pas affectés de la même façon ni dans les mêmes proportions ; une compétence qui aura décliné ou disparu dans un pays pourra occuper une position solide dans un autre. L'une des solutions aux problèmes auxquels le secteur est confronté est donc la collaboration internationale.

Progrès réalisés dans le domaine de l'enseignement et de la formation

Le rapport de l'OCDE/AEN, *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*, publié en juillet 2000, a fait un premier diagnostic chiffré de l'enseignement nucléaire dans les pays membres. Il a confirmé ce que beaucoup soupçonnaient depuis longtemps : que, dans la plupart des pays, l'enseignement des disciplines nucléaires avait décliné au point qu'il était devenu difficile de maintenir les connaissances spécialisées et les compétences dans les technologies nucléaires de base. Malgré un tableau plutôt sombre de la situation globale, on pouvait trouver un certain réconfort dans l'éventail des initiatives recensées. Si elles ne permettaient pas de développer l'enseignement et la formation dans le domaine nucléaire, elles mettaient au moins un frein à leur dépérissement. Le rapport faisait un certain nombre de recommandations aux gouvernements, aux universités, à l'industrie et aux instituts de recherche en vue de prolonger les initiatives en cours et d'en susciter de nouvelles.

Chaque gouvernement a réagi à sa manière. Certains ont lancé, ou appuyé, une batterie d'initiatives, souvent fondées sur leurs propres études complémentaires des besoins en matière d'enseignement et de main-d'œuvre dans le domaine nucléaire. D'autres se sont abstenus de toute initiative, peut-être parce qu'ils préfèrent laisser le secteur nucléaire réagir aux mécanismes du marché, parce qu'ils ont décrété un moratoire sur l'énergie nucléaire ou tout simplement parce qu'il existe déjà des programmes appropriés.

De nombreux indices montrent que les deux recommandations faites aux universités, à savoir qu'elles devraient offrir des programmes d'enseignements fondamentaux attrayants et qu'elles devraient dialoguer souvent, et à un stade précoce, avec les étudiants potentiels, sont suivies d'effets. Il est difficile de déterminer la part respective du rapport de l'AEN et des forces du marché dans cette évolution, mais il est indiscutable que les nombreuses actions lancées par les universités se traduisent par une augmentation du nombre des étudiants qui choisissent des disciplines nucléaires.

Le rapport faisait deux recommandations à l'industrie : continuer d'offrir des programmes de formation rigoureux et mieux collaborer avec les universités et les instituts de recherche afin de séduire la jeune génération. À l'évidence, la première de ces deux recommandations est mise en œuvre, même si ce résultat s'explique probablement davantage par l'intérêt bien compris de l'industrie et par une réaction aux prescriptions réglementaires que par le rapport de l'AEN. Quant à la seconde, il est indéniable que l'industrie, les universités et les instituts de recherche continuent de travailler de concert, mais rien ne montre qu'ils le font plus efficacement qu'auparavant.

Les instituts de recherche connaissent des problèmes de recrutement analogues à ceux de l'industrie. En outre, leur situation financière se dégrade dans de nombreux pays en raison de la diminution des financements publics et de la vive concurrence dans le créneau où ils commercialisent leurs services et leurs produits. Il est donc difficile pour les instituts de recherche de mettre en œuvre la recommandation qui leur est faite d'attirer les meilleurs étudiants et les meilleurs collaborateurs en élaborant des projets de recherche dynamiques susceptibles d'intéresser l'industrie.

Ressources humaines

Dans l'éventualité d'un fléchissement des effectifs dans leurs industries nucléaires, de nombreux pays membres de l'AEN ont lancé des études pour déterminer l'ampleur du problème. Malgré les très nombreuses initiatives en cours en faveur de l'enseignement et de la formation dans le domaine nucléaire, ces enquêtes nationales montrent que le nombre des ingénieurs et des scientifiques diplômés dans les disciplines nucléaires est insuffisant pour répondre à la demande.

Dans de nombreux pays, la désaffection persistante des étudiants pour la science, l'ingénierie et les matières technologiques a entraîné ces dernières années une baisse de la proportion des étudiants diplômés dans ces domaines. Les diplômés de grande valeur dans les disciplines techniques se faisant toujours plus rares, ils sont de plus en plus recherchés et l'industrie a déjà commencé à en pâtir. C'est un sujet de préoccupation pour l'industrie nucléaire, car la majorité des scientifiques et des ingénieurs qu'elle emploie n'ont pas reçu un enseignement spécialisé dans le domaine nucléaire.

Outre cet effet direct, l'industrie souffre aussi indirectement, car la capacité des organisations à pallier la pénurie de diplômés dotés d'un bagage solide dans le domaine nucléaire en recrutant des diplômés techniques de haut niveau et en les formant en interne se trouve également compromise.

En atteignant la maturité, l'industrie nucléaire a développé des domaines de compétences transférables à d'autres industries. On a donc enregistré un flux de personnel du secteur nucléaire vers d'autres secteurs, ce qui était commode lorsque l'industrie était en phase de consolidation et souhaitait réduire ses effectifs. Maintenant qu'elle ne peut plus se payer le luxe de la moindre réduction supplémentaire dans les compétences existantes et qu'elle doit en développer de nouvelles dans des domaines tels que le démantèlement et la décontamination, attirer de jeunes talents, retenir le personnel en place et recruter des experts originaires d'autres secteurs s'avère problématique dans de nombreux pays à cause de la concurrence exercée par d'autres industries jugées plus porteuses.

Nombre des problèmes susmentionnés peuvent être réglés par le biais de programmes de R-D diversifiés et dynamiques. Au sein des entreprises, la R-D est aussi importante pour la formation du personnel que pour le progrès technique. Là où l'industrie collabore avec des universités et des instituts de recherche, on trouve aussi une source de recrutement non négligeable. En outre, ces collaborations constituent un vivier de personnel qualifié et expérimenté, auquel peuvent faire appel, au cas par cas, tant l'industrie que les organes réglementaires. Par ailleurs, les activités de R-D menées dans les universités revitalisent le système éducatif en ouvrant la voie à de nouvelles disciplines, en fournissant des sujets de thèses et en encourageant les universitaires à coopérer de façon constructive avec l'industrie.

Dans une certaine mesure, la situation en matière de ressources humaines peut être améliorée par la mobilité des chercheurs et des experts. La mobilité est souvent perçue comme un élément important de l'enseignement et de la formation d'un individu, d'une part, et comme un moyen efficace de faire face à une surcharge de travail ponctuelle ou de transférer des connaissances, d'autre part. Cependant, il se pourrait que la mobilité des chercheurs soit en fait plutôt limitée. Apparemment, certains organismes de recherche acceptent plus volontiers de recevoir des chercheurs que de se séparer des leurs.

Recherche et développement

Tous les pays qui ont donné des informations sur ce sujet consacrent des ressources considérables, mesurées en termes de personnes-années, à la gestion des déchets radioactifs. En

revanche, bien que le démantèlement fasse l'objet d'activités de R-D dans tous les pays consultés, il draine généralement peu de ressources. La conception des centrales est un sujet d'intenses activités de recherche dans de nombreux pays. En général, ces activités visent à améliorer la sûreté et le rendement des centrales existantes plutôt qu'à étudier des concepts de centrales innovants. C'est probablement pourquoi, dans la plupart des pays, la recherche de nouveaux matériaux n'occupe pas une place de choix. L'intérêt pour les recherches concernant le combustible varie considérablement d'un pays à l'autre et dépend d'une multiplicité de facteurs : améliorer les performances économiques des centrales en exploitation, faciliter la gestion des déchets et promouvoir des concepts de centrales innovants.

Il est difficile de dégager des tendances communes à tous les pays dans la R-D financée par les entreprises. Il semblerait toutefois que, globalement, l'effort porte davantage sur les réacteurs en exploitation que sur les systèmes futurs. Les projets nationaux prennent le pas sur les projets internationaux. Les projets couvrent le court, le moyen et le long terme ; il n'y a pas de dénominateur commun. Comme on pouvait s'y attendre s'agissant de la recherche financée par les entreprises, les considérations économiques sont très présentes, mais la sûreté reste primordiale dans tous les pays sans exception. Dans la plupart des pays, l'industrie nucléaire finance la recherche libre et les moyens dégagés viennent très souvent en complément du financement public de la recherche. Certes, l'acquisition de connaissances techniques est une chose importante, mais il ne fait aucun doute qu'appuyer la recherche libre contribue à assurer la pérennité d'un réservoir d'experts dans des secteurs essentiels au sein des universités et des centres de recherche ; leur rôle est crucial pour l'évaluation indépendante de questions clés telles que la fiabilité et la sûreté des centrales.

Ces dernières années, le financement public de la R-D nucléaire a chuté de façon spectaculaire dans la plupart des pays. La priorité a été, et demeure, la sûreté des centrales nucléaires existantes et la gestion des déchets. Cependant, on voit poindre dans quelques pays des programmes en faveur de futurs réacteurs innovants. L'argent public n'est plus uniquement affecté au soutien de la R-D à l'échelon national ; il est de plus en plus utilisé pour financer la collaboration internationale. Tous les pays reconnaissent la nécessité de maintenir les qualifications et les compétences essentielles et les financements publics reflètent cette préoccupation. Toutefois, compte tenu du désengagement du secteur public enregistré ces dernières années dans la plupart des pays, cette responsabilité retombe de plus en plus sur l'industrie.

Collaboration internationale

Le ralentissement intervenu ces dernières années dans de nombreux programmes de recherche nucléaire financés à l'échelon national, ainsi que les fermetures d'installations et la perte de connaissances spécialisées qu'il a entraînées, ont incité les pays à se tourner vers la collaboration internationale. Si les arrangements bilatéraux restent d'actualité, les programmes multilatéraux faisant intervenir un grand nombre de pays et d'instituts de recherche sont de plus en plus privilégiés de façon à optimiser l'utilisation des installations et des compétences et à partager les coûts. Certaines organisations telles que l'AEN, la CE et l'AIEA interviennent activement pour promouvoir et coordonner ce mode de collaboration, et aussi pour veiller à l'ouvrir à un éventail de participants aussi large que possible. L'AEN a adopté une stratégie visant à maintenir certains types d'installations de recherche essentiels par le biais de ces accords de collaboration.

Si les centres de recherche nucléaire peuvent se prévaloir d'une longue tradition de collaboration internationale, il n'en va pas de même pour les universités. La création de quelques réseaux régionaux en collaboration en Europe et en Asie est une initiative récente. Qu'il s'agisse de maintenir l'expertise pédagogique dans les matières liées au nucléaire ou les moyens de recherche, les mêmes principes

s'appliquent, en particulier dans les pays où cette expertise risque de faire défaut. À cet égard, des efforts supplémentaires peuvent être déployés à l'échelon national pour intensifier la coopération entre les universités ; à l'échelon international, les organismes reconnus ont un rôle clé à jouer dans la promotion et la coordination de la coopération internationale.

Certes, les intérêts commerciaux freinent la collaboration entre les entreprises industrielles. Quelques-unes ont fusionné et, en conséquence, leurs activités internes ne sont plus cantonnées à l'intérieur des frontières nationales. Toutefois, force est de reconnaître que, globalement, la collaboration industrielle ne sera jamais totalement exempte de contraintes.

La collaboration, l'échange d'informations, voire l'échange de personnel, ont toujours été indissociables de l'essor de l'énergie nucléaire – dans les limites imposées par les impératifs politiques. C'est en grande partie grâce à la collaboration internationale que l'énergie nucléaire s'est transformée, en l'espace d'une seule génération, en une source d'énergie fiable qui fournit un pourcentage significatif de l'électricité produite dans de nombreux pays. L'avenir de l'énergie nucléaire dépendra encore davantage de la collaboration internationale, mais tant qu'il y aura des initiatives telles que le projet de réacteur de Halden (AEN) et le Forum international Génération IV, un optimisme prudent sera permis.

I. INTRODUCTION

Alors que les études précédentes de l'AEN (Agence pour l'énergie nucléaire) mettaient l'accent sur les compétences et les infrastructures nucléaires dans certains secteurs d'activité, tels que la sûreté ou l'enseignement, la présente étude, lancée par le Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) en collaboration avec le Comité des sciences nucléaires (CSN) aborde les questions des infrastructures et des compétences nucléaires dans une perspective plus large. L'étude recense :

- Les progrès accomplis au regard des recommandations présentées dans une étude antérieure, *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?* [1]
- Les questions liées aux ressources humaines et la R-D.
- Les mécanismes et les pratiques exemplaires en matière de collaboration internationale.

Le cycle de vie de l'industrie nucléaire n'est pas différent de celui des autres industries, ni d'ailleurs de la plupart des formes d'activité humaine : naissance, croissance, maturité, déclin, renaissance et renouveau ou mort. Les industries issues du XIX^{ème} siècle, telles que le chemin de fer, l'industrie chimique ou la sidérurgie, ont accompli la totalité de leur cycle alors que les industries plus récentes, telles que l'espace, l'aéronautique et l'énergie nucléaire, n'en ont parcouru qu'une partie. La position d'un secteur industriel dans son cycle de vie dépend du développement et des besoins économiques. S'agissant de l'industrie nucléaire, certains pays ont atteint le stade de la maturité ; d'autres sont engagés sur la voie du déclin et se demandent s'ils doivent relancer l'activité ou y mettre un terme ; d'autres encore se lancent dans la construction de nouvelles installations.

Bien que le cycle de vie puisse constituer un élément commun à toutes les activités industrielles, chacune d'entre elles possède des particularités qui la distinguent des autres. Les traits distinctifs du secteur de l'énergie nucléaire sont la longueur des durées de vie des installations et l'excellence technique. Les premières centrales nucléaires étaient conçues pour fonctionner pendant trente ans ; aujourd'hui, on table sur une durée de vie de 50 à 60 ans. Lors de la fermeture d'une centrale nucléaire, le temps nécessaire pour le démantèlement et la décontamination peut égaler, voire excéder la durée d'exploitation. La totalité du cycle de vie peut s'étendre sur plus d'un siècle. L'évolution technique rapide de l'industrie n'aurait pas été possible sans une multitude de programmes de recherche et de développement de haut niveau. Grâce à ces programmes et aux liens tissés avec les universités et les instituts de recherche, l'accumulation des connaissances techniques est allée de pair avec la formation du personnel techniquement compétent pour assurer la sécurité d'exploitation de l'industrie nucléaire.

La longueur de la durée de vie des installations, conjuguée au besoin de compétences techniques, place aujourd'hui l'industrie devant un double problème : comment maintenir les qualifications et les compétences existantes pendant les cinquante années ou davantage d'exploitation d'une centrale nucléaire dans un pays où l'industrie peut être parvenue à maturité ou avoir entamé son déclin et où aucune construction nouvelle n'est envisagée dans l'immédiat, et comment développer et maintenir de nouvelles qualifications et compétences dans les domaines du démantèlement et de la gestion des déchets radioactifs qui sont considérés comme des activités de fin de vie et qui attirent peu de jeunes gens.

Ces problèmes sont aggravés par la libéralisation croissante des marchés de l'énergie à l'échelle mondiale. L'industrie nucléaire est désormais contrainte de réduire ses coûts de façon draconienne pour rivaliser avec d'autres filières aux cycles de vie technologiques différents. C'est pourquoi, dans de nombreux pays, le financement public a été considérablement réduit, voire supprimé, et les marges bénéficiaires des producteurs ont été laminées. Il en est résulté une baisse des prix de l'électricité, mais aussi une perte de compétences consécutive aux compressions d'effectifs destinées à diminuer les coûts salariaux, des fermetures d'installations pour réduire les dépenses d'exploitation et un recul des aides au secteur universitaire pour abaisser les charges fixes.

Au final, on constate au plan technique un ralentissement de l'innovation et une perte de compétences et de qualifications. Cependant, tous les pays ne se trouvant pas au même stade du cycle de vie de la technologie nucléaire, ils ne sont pas affectés de la même façon ni dans les mêmes proportions ; une compétence qui aura décliné ou disparu dans un pays pourra occuper une position solide dans un autre.

La présente étude a été réalisée par un groupe d'experts, créé sous les auspices de l'AEN et constitué de représentants de onze pays membres : Allemagne, Belgique, Canada, Corée, États-Unis, Finlande, France, Italie, Japon, Royaume-Uni, Suède ainsi que de la Commission européenne (CE) et de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

Les informations concernant les trois aspects cités plus haut ont été obtenues grâce à un questionnaire élaboré et diffusé par l'AEN en 2002. Les membres du groupe d'experts se sont chargés de le distribuer dans leur propre pays et de classer les réponses. Lorsqu'un pays n'était pas représenté dans le groupe d'experts mais souhaitait néanmoins participer à l'étude, le NDC a recueilli les informations en son nom.

Quinze pays ont répondu au questionnaire : Allemagne, Autriche, Belgique, Canada, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Italie, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, ainsi que la Commission européenne. Toutefois, la section consacrée à la R-D, bien que riche en informations factuelles, est le plus souvent pauvre en données chiffrées, qu'il s'agisse des ressources humaines ou des installations engagées dans cette activité.

II. ENSEIGNEMENT ET FORMATION

Introduction

Les données réunies pour le rapport OCDE/AEN, *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?* ont confirmé que, dans beaucoup de pays, l'enseignement et la formation nucléaires étaient en déclin depuis des années et que la situation commençait à devenir alarmante. Il était évident que, faute de redresser la barre et de redynamiser l'enseignement et la formation, tant l'offre de personnel qualifié que le niveau et la pertinence de la contribution apportée à l'industrie par la recherche et le développement seraient sérieusement compromis. Compte tenu des délais inhérents au processus d'évolution de l'enseignement et de la formation, une action immédiate s'imposait, d'où la formulation dans le rapport d'un certain nombre de recommandations aux gouvernements, universités, industries et instituts de recherche. Elles sont énumérées dans chapitre V.

Trois ans après leur publication, dans la perspective d'un partage des bonnes pratiques, un questionnaire (voir annexe 5) a été diffusé pour faire le bilan des initiatives qui avaient été prises à la suite de ces recommandations. Les conclusions sont récapitulées ci-dessous. Dans l'annexe 4 les rapports par pays restituent les contextes nationaux dans lesquels il convient de placer ces résultats. L'analyse détaillée des collaborations internationales fait l'objet d'un traitement distinct dans le chapitre IV.

Initiatives gouvernementales

Pour diverses raisons, certains gouvernements se sont abstenus de toute initiative. Le gouvernement italien continue de maintenir un moratoire sur l'énergie nucléaire. Néanmoins, des chercheurs de l'Agence italienne pour la technologie, l'énergie et l'environnement (ENEA) continuent à participer à des réunions consacrées à l'énergie nucléaire, à collaborer avec des partenaires nationaux et internationaux dans certaines domaines de recherche nucléaire et à participer à des projets internationaux. Toutefois, les étudiants ne peuvent pas être officiellement orientés vers une formation nucléaire. Le gouvernement espagnol a opté pour une politique non interventionniste en laissant le secteur nucléaire réagir aux mécanismes du marché. Le gouvernement suédois s'est également désengagé et confie au Service national d'inspection de l'énergie nucléaire (SKI) la responsabilité des questions de portée nationale dans le secteur nucléaire. Le SKI a créé, en coopération avec l'industrie, le Centre suédois de technologie nucléaire, qui finance la recherche universitaire, subventionne des postes pour des chercheurs de haut niveau et gère une école nationale d'études supérieures. Aucun argent public n'est concerné ; les fonds sont le produit d'une taxe prélevée sur les compagnies d'électricité. La France n'a pas besoin de prendre de mesures urgentes, car elle a une longue tradition de soutien à la formation dans le domaine nucléaire y compris la sûreté, essentiellement au niveau des étudiants de troisième cycle. Le poids de la filière nucléaire en France, forte des services d'ingénierie des entreprises, de la recherche nucléaire menée par le CEA et l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN), garantit durablement le succès de cette approche.

Les gouvernements ont réagi chacun à leur manière à la recommandation de mettre en œuvre dans le domaine énergétique une planification stratégique prenant en compte l'enseignement, la main-

d'œuvre et les infrastructures. Le gouvernement coréen avait amendé sa loi sur l'énergie atomique dès 1995, aussi existait-il une base juridique pour revoir le Plan global de promotion de l'énergie nucléaire (CNEPP) tous les cinq ans. Le CNEPP comprend des objectifs d'action, des plans d'investissement et des budgets à long terme. Si la plupart des autres gouvernements ont lancé ou encouragé certaines mesures dans le domaine de l'énergie nucléaire, rares sont ceux qui ont invoqué leur plan stratégique en matière d'énergie en liaison avec leur volonté de relever les défis de l'énergie nucléaire. En 2003, le gouvernement du Royaume-Uni a jeté les grandes lignes de sa politique énergétique dans un Livre blanc. À l'évidence, il n'entend pas se fermer la porte du nucléaire, mais le secteur énergétique étant libéralisé au Royaume-Uni depuis quelque temps déjà, toute décision de construire de nouvelles installations appartiendrait au secteur privé et devrait répondre aux exigences des investisseurs privés. Les États-Unis ont adopté en 2001 une politique énergétique nationale qui plaide en faveur d'un recours accru à l'énergie nucléaire. Le ministère de l'Énergie dispose d'un projet de Plan stratégique qui prône également l'expansion de l'énergie nucléaire. D'autres gouvernements se préoccupent également de l'avenir de l'énergie nucléaire, mais sans inscrire cette réflexion dans une planification stratégique, tandis que d'autres encore n'ont pris aucune mesure particulière, comme cela a été indiqué plus haut.

La recommandation faite aux gouvernements de contribuer, à défaut d'en assumer la responsabilité, à une planification intégrée visant à garantir la disponibilité des ressources humaines nécessaires pour faire aux obligations et traiter les problèmes en suspens, est celle qui a retenu le plus d'attention.

Dans l'éventualité d'un fléchissement des effectifs dans leurs industries nucléaires, un certain nombre de gouvernements ont lancé des études pour cerner le problème. En septembre 2001, le gouvernement du Royaume-Uni a chargé un groupe ad hoc de réaliser une étude concernant l'offre de personnel ayant les compétences et la formation adéquates pour répondre aux besoins du secteur de l'énergie nucléaire, en ce qui concerne la santé et l'environnement, ainsi que la production d'électricité, dans les dix à quinze prochaines années. Selon l'étude, il faudrait un apport de 50 000 nouvelles recrues pendant la période envisagée pour répondre à la demande anticipée. Au début de 2004, le *Sector Skills Council*, organisme permanent financé par l'industrie et le gouvernement a pris la responsabilité de ces questions stratégiques. Le gouvernement du Royaume-Uni met également en place une agence non gouvernementale, la *Nuclear Decommissioning Authority*, pour résoudre les problèmes d'environnement résultant des déchets résiduels, de la gestion du combustible irradié et du démantèlement des centrales nucléaires, et l'on prévoit que cette initiative aura des conséquences considérables pour les besoins futurs en matière de formation et d'enseignement. Le gouvernement coréen a subventionné une enquête sur le nombre, l'âge et les qualifications des ingénieurs nucléaires dans les organismes nucléaires nationaux. Conjuguée avec l'avertissement lancé par l'Organisation coréenne des Chefs de département d'ingénierie nucléaire concernant le déclin dans l'enseignement des disciplines nucléaires, cette étude a entraîné l'élargissement du programme de mise en valeur des ressources humaines de façon à y intégrer les étudiants des premier et deuxième cycles qui se spécialisent en génie nucléaire. En Allemagne, d'après une analyse de la structure des effectifs et de la demande future de spécialistes en technologie nucléaire dans les compagnies d'électricité, les industries de fabrication et de services, les organismes chargés de la réglementation et de la délivrance des autorisations, d'une part, et des moyens d'enseignement dans les universités, y compris le nombre d'étudiants suivant des cours dans les disciplines nucléaires, d'autre part, l'enseignement et la formation ont jusqu'à présent répondu à la demande de l'industrie. Cependant, si la tendance actuelle ne se dément pas, une grave pénurie de compétences dans le domaine nucléaire devrait se produire dans les dix à vingt prochaines années. La Hongrie a également réalisé une étude, achevée en 2003, sur les ressources humaines dans l'industrie nucléaire.

La réaction des autres gouvernements fait apparaître une diversité dans les approches. Le gouvernement japonais encourage activement l'enseignement dans les domaines de l'énergie et de l'énergie nucléaire par le biais du ministère de l'Éducation, de la Culture, du Sport, de la Science et de la Technologie (MEXT). Il fixe les orientations en matière d'enseignement ainsi que les programmes appropriés à chaque niveau et, depuis 2002, il subventionne la mise en oeuvre d'une panoplie de mesures allant de la fourniture de matériel pédagogique destiné aux enseignants à la formation des enseignants. Le MEXT élargit également la formation du personnel de recherche en apportant une aide substantielle aux instituts de recherche. Le gouvernement belge a rappelé la nécessité de ne pas hypothéquer l'avenir de la filière nucléaire et donc de maintenir le potentiel scientifique et technique au niveau requis pour garantir des conditions optimales en matière de sûreté et de performance. Cela se fera en préservant un savoir-faire nucléaire au plan national et en participant à des activités de R-D sur les concepts de réacteurs innovants, dont la plupart sont financées par le secteur privé. De son côté, le ministère finlandais du Commerce et de l'Industrie a publié un rapport sur la gestion des compétences nucléaires auquel ont contribué tous les acteurs concernés. L'initiative canadienne visant à assurer à l'industrie nationale les ressources humaines dont elle a besoin présente la particularité de transcender les frontières traditionnelles entre le gouvernement, l'université et l'industrie. Le Réseau d'excellence universitaire en génie nucléaire (UNENE) regroupe des universités, des exploitants de centrales nucléaires, et des organismes de recherche et de réglementation. L'UNENE est une association à but non lucratif créée par l'industrie canadienne dans le but d'assurer durablement une relève d'ingénieurs et de scientifiques qualifiés à la hauteur des besoins présents et futurs de l'industrie nucléaire canadienne en favorisant l'enseignement universitaire et une formation de type universitaire et en encourageant les jeunes gens à faire carrière dans le nucléaire. Toujours en Amérique du Nord, le gouvernement des États-Unis a mené une politique très volontariste de mise en place de programmes nouveaux au cours des trois dernières années. Le ministère de l'Énergie (DOE) des États-Unis a lancé des programmes destinés aux enseignants de matières scientifiques dans les écoles secondaires ; un programme de partenariat avec les universités visant à accroître le nombre d'étudiants appartenant à des groupes minoritaires dans les disciplines liées au nucléaire ; un programme de radiochimie à l'intention des étudiants diplômés et des post-doctorants en vue d'améliorer le niveau de l'enseignement et de la recherche ; un nouveau mécanisme de bourses pour les étudiants qui souhaitent suivre le programme sur la propulsion nucléaire navale ; et le programme d'Innovation dans l'infrastructure et l'enseignement nucléaire (INIE) qui encourage les universités à faire de nouveaux investissements dans leurs réacteurs de recherche et leurs programmes d'ingénierie nucléaire tout en instaurant de nouveaux partenariats stratégiques avec d'autres universités, des laboratoires nationaux et l'industrie nucléaire. Le programme INIE finance actuellement des activités dans 32 universités à travers les États-Unis.

Plusieurs des initiatives déjà citées répondent à la troisième recommandation faite aux gouvernements d'appuyer les jeunes étudiants, la R-D et la modernisation des installations, notamment : l'aide apportée par le Japon, par le biais du MEXT, à l'enseignement des disciplines nucléaires ; l'engagement du gouvernement belge à participer à la R-D sur les concepts de réacteurs innovants ; l'initiative canadienne UNENE ; le Centre suédois de technologie nucléaire ; et l'infrastructure en place de longue date en France.

Aux États-Unis, le DOE et la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) ont l'un et l'autre mis en oeuvre des programmes visant à attirer et à aider les étudiants. Le DOE a augmenté le nombre de bourses d'étude et de recherche offertes aux étudiants tandis que la NRC a organisé un programme de stages de familiarisation destiné à recruter des étudiants en son sein, en mettant particulièrement l'accent sur les questions techniques relatives aux performances des centrales nucléaires. Au DOE, des programmes sont en cours depuis trois ans pour attirer des étudiants appartenant à des groupes minoritaires dans le secteur nucléaire et pour dynamiser la recherche, notamment le programme INIE qui instaure des partenariats associant universités, laboratoires

nationaux (publics), services publics et secteur privé. Une grande partie du financement est orientée vers la recherche et un montant considérable est affecté par les bénéficiaires à la modernisation des installations, notamment des réacteurs de recherche, des laboratoires et des centres de calcul informatique. En Finlande, le gouvernement finance la recherche sur la sûreté nucléaire et la gestion, et l'autorité de sûreté détache de jeunes recrues auprès d'autres organes réglementaires dans le cadre d'initiatives de formation à l'échelle internationale. En Allemagne, le gouvernement a annoncé la création d'un fond pour aider plusieurs doctorants à mener des recherches sur la sûreté des réacteurs nucléaires en exploitation. Le gouvernement coréen a mis en place un programme de développement de l'infrastructure de recherche nucléaire, assorti d'une augmentation du financement de la recherche, afin de donner aux universités davantage de moyens de réaliser des recherches indépendantes et de participer à de grands projets de recherche nationaux. En outre, dans le cadre du programme de perfectionnement de la main-d'œuvre, plus de 50 étudiants du premier et du deuxième cycles se spécialisant en génie nucléaire ont reçu des aides substantielles en 2002, et plus de 70 en 2003.

Dans l'ensemble, la recommandation faite aux pouvoirs publics d'apporter un soutien par le biais de l'instauration de « réseaux ou ponts éducatifs » entre les universités, l'industrie et les instituts de recherche est restée lettre morte. Selon certaines indications, des initiatives dans ce sens ont été lancées mais n'ont pas encore abouti, par exemple, la création du *Nuclear Sector Skills Council* au Royaume-Uni, le réseau de compétences en technologie nucléaire en Allemagne, l'étude finlandaise sur la gestion des connaissances nucléaires et le Centre suédois de technologie nucléaire. Les deux pays qui ont poussé le plus loin cette logique de réseau sont probablement le Canada, grâce au UNENE, et les États-Unis, par le biais du programme INIE. À l'inverse, la France, qui possède une infrastructure extrêmement développée, ne dispose pas d'un réseau formellement constitué.

Initiatives prises par les universités

Il y a de bonnes raisons de penser que les deux recommandations faites aux universités, à savoir offrir des programmes d'enseignement fondamentaux attrayants et dialoguer souvent, et à un stade précoce, avec les étudiants potentiels, sont effectivement mises en œuvre. Il est difficile de déterminer la part respective du rapport de l'AEN et des forces du marché dans cette évolution, mais il est indiscutable que les nombreuses actions lancées par les universités sont profitables à l'enseignement et à la formation dans le domaine nucléaire.

Autrefois sur des positions diamétralement opposées, l'industrie nucléaire et le monde universitaire conjuguent désormais très souvent leurs efforts pour surmonter la crise que traverse l'enseignement des disciplines nucléaires dans de nombreux pays. Au niveau de la maîtrise, les universités britanniques ont maintenu les cours existants, et en ont même introduit de nouveaux, à la suite de discussions avec l'industrie et pour répondre aux besoins identifiés. Dans une université, un partenariat entre l'université, l'autorité de sûreté et un groupe d'entreprises a permis le maintien d'un enseignement nucléaire au programme depuis de longues années qui aurait été autrement supprimé en raison du désengagement financier des pouvoirs publics. Au Canada, l'initiative UNENE se traduira par la création de nouveaux postes de professeurs dans le domaine nucléaire dans six universités de l'Ontario et une augmentation des crédits octroyés à la recherche nucléaire dans quelques universités. À l'issue de consultations approfondies avec tous les acteurs de la filière nucléaire, y compris l'entreprise publique d'électricité, les organes réglementaires et l'organisme chargé de la recherche, pour déterminer précisément les besoins, une université française a créé un diplôme de maîtrise en gestion des déchets radioactifs. Le contenu du diplôme, unique en France, contribuera largement à répondre aux besoins d'enseignement et de formation de l'industrie.

On dit souvent que la recherche aiguillonne l'enseignement. Dans plusieurs universités du Royaume-Uni, un effort de promotion de la recherche dans le domaine nucléaire, au travers d'accords de recherche industrie/universités, a aiguisé l'intérêt pour les matières nucléaires parmi les étudiants des premier et deuxième cycles. Il en est résulté une augmentation du nombre des étudiants inscrits dans les programmes nucléaires proposés et la mise en place de nouveaux enseignements. Cette expérience est de bonne augure pour l'avenir de la recommandation faite à l'industrie canadienne d'essayer de remédier à la baisse de ses effectifs en renforçant ses liens de recherche avec les universités et ce faisant stimuler l'enseignement nucléaire. En Allemagne, plusieurs universités ont constitué un réseau de compétences en technologie nucléaire. Les membres du réseau sont reliés à un centre de recherche. Des scientifiques appartenant aux divers centres de recherche donnent des cours dans les universités, et les étudiants peuvent faire des stages et préparer des diplômes ou des thèses de doctorat dans des installations proches de leur domicile.

Le succès de l'enseignement nucléaire passe par un travail de médiatisation et de promotion auprès des étudiants. Certaines universités allemandes s'y sont livrées en intégrant des éléments pluridisciplinaires qui font appel aux moyens pédagogiques les plus modernes et aux ressources d'Internet. On encourage les étudiants à élargir leur base de connaissances en leur donnant la possibilité de publier une revue nucléaire et d'analyser des articles sur ce thème. Deux universités techniques suédoises de première importance ont créé un centre de compétence en technologie nucléaire afin de coordonner l'enseignement et la recherche dans différents départements. Dans certaines universités japonaises, des professeurs supplémentaires ont été recrutés pour renforcer le corps enseignant et accroître l'attractivité des programmes dans les enseignements de premier cycle. Pour augmenter l'attrait des enseignements de troisième cycle, quelques universités japonaises ont inauguré un système conjuguant deux matières principales. L'intéressé étudie de front un sujet touchant à l'ingénierie nucléaire et un deuxième sujet relevant d'une autre discipline d'ingénierie. Cela permet aux spécialistes du nucléaire d'élargir leurs connaissances et à ceux qui ne souhaitent pas faire carrière dans l'industrie nucléaire d'avoir des notions dans cette discipline. Certaines universités américaines ont non seulement recruté de nouveaux enseignants et rénové leurs programmes, mais elles ont aussi investi dans de nouvelles installations et de nouveaux équipements pour attirer des étudiants. La perspective d'étudier à l'étranger séduit de nombreux étudiants. Une université belge, demande à ses futurs diplômés de passer une année dans une institution nucléaire étrangère dans le cadre de leur formation en génie nucléaire. Des représentants de cette université et d'autres organisations nucléaires étrangères contribuent aux cours par le biais, par exemple, d'un enseignement individuel et de séminaires. En Corée, le programme de perfectionnement du personnel dans le secteur nucléaire subventionne une mission d'une ou deux semaines dans une installation nucléaire étrangère pour les étudiants particulièrement brillants, ainsi que des programmes de formation à long terme d'une durée supérieure à six mois. Ces dernières années, une université hongroise a noué des liens avec des universités et des instituts de recherche européens, donnant ainsi à ses étudiants la possibilité de poursuivre une partie de leurs études à l'étranger. Cependant, le flux des étudiants ne se fait pas toujours à sens unique. Le fait que l'université possède un réacteur de formation sans équivalent en Europe centrale est une incitation pour les étudiants étrangers, ainsi que pour les étudiants d'autres universités hongroises, à étudier dans cette université.

Comme dans maints aspects de la vie moderne, l'Internet acquiert une importance croissante. Au Royaume-Uni, un site Web qui recense l'ensemble des cours universitaires ayant un contenu nucléaire et offre des connexions directes avec les sites Web des universités a connu un grand succès auprès des étudiants. En Allemagne, la jeune génération dialogue avec les étudiants par l'intermédiaire de l'Internet. C'est également le cas au Royaume-Uni. On a déjà mentionné l'utilisation par les universités allemandes des moyens offerts par l'Internet. En Italie, les universités qui traitent du nucléaire ou de disciplines connexes se sont efforcées de maintenir des cours intéressants et thématiques. Le moyen de communication privilégié avec les étudiants est l'Internet et beaucoup

d'enseignants ont leur propre page Web qui leur sert à informer les étudiants au sujet des cours. Dans les universités américaines, l'enseignement à distance est une pratique bien établie. Les étudiants peuvent suivre des cours qui ne sont pas dispensés dans leur propre université ou d'autres qui sont proposés pendant un semestre où eux-mêmes peuvent ne pas être disponibles. La Corée a également mis sur pied des programmes d'enseignement et de formation par l'Internet et, en collaboration avec l'AIEA, a proposé de les étendre pour constituer un réseau asiatique d'enseignement supérieur en technologie nucléaire (*Asian Network for Higher Education in Nuclear Technology –ANENT*).

Regrouper des cours auxquels sont inscrits un nombre d'étudiants insuffisant est un bon moyen de maintenir l'enseignement nucléaire. Cinq universités belges, en collaboration avec le Centre belge de recherche nucléaire, ont fusionné deux programmes de troisième cycle en un programme unique, enseigné en anglais. L'initiative vise à rationaliser le diplôme de maîtrise en génie nucléaire. Cinq subventions non négligeables sont octroyées chaque année à cet effet. En Suède, des centres nucléaires ont été créés dans deux universités pour promouvoir la coopération entre les départements nucléaires et pour exercer un contrôle à la fois sur les cours proposés dans les disciplines nucléaires et sur le nombre des étudiants qui les suivent.

La perspective de nouvelles installations peut stimuler l'enseignement. En Finlande, une université modifie actuellement ses programmes pour tenir compte de la construction d'un nouveau réacteur. Pour mieux promouvoir la technologie des centrales nucléaires auprès des étudiants une autre l'a récemment hissée au rang de discipline à part entière, en la détachant de la technologie des centrales électriques en général. Simultanément, l'université en question a accueilli une unité de recherche sur la sûreté nucléaire appartenant au Centre de recherche technique (VTT) et étoffé ses effectifs d'enseignants.

Quelques universités américaines ont chargé des spécialistes du recrutement d'augmenter le nombre des étudiants qui s'inscrivent dans les disciplines nucléaires. Là réside probablement la principale explication à l'accroissement du nombre des étudiants des premier et deuxième cycles en génie nucléaire enregistré par beaucoup de facultés au cours des trois années passées.

Plusieurs universités organisent des cours d'été, d'une durée de quelques jours à quelques semaines, pour donner aux élèves des écoles secondaires un aperçu des enseignements dans le domaine nucléaire. Au Japon, certaines universités soutiennent des programmes nucléaires dans les établissements scolaires voisins ; d'autres proposent des conférences à destination du public. En Hongrie, la population est incitée à visiter le réacteur de formation et l'université reçoit quelque 5 000 visiteurs chaque année, parmi lesquels un grand nombre d'élèves de l'enseignement secondaire.

Initiatives prises par l'industrie

Dans son rapport, l'AEN fait deux recommandations à l'adresse de l'industrie : continuer d'offrir des programmes de formation rigoureux et mieux collaborer avec les universités et les instituts de recherche afin de séduire la jeune génération. À l'évidence, la première de ces deux recommandations est mise en œuvre, même si ce résultat s'explique probablement davantage par l'intérêt propre des industriels et par une réaction aux prescriptions réglementaires que par la recommandation du rapport de l'AEN. Quant à la seconde, il est indéniable que l'industrie, les universités et les instituts de recherche continuent de travailler de concert, mais rien n'indique dans les informations reçues qu'ils le font plus efficacement qu'auparavant.

Dans de nombreux pays, l'industrie nucléaire éprouve des difficultés croissantes à recruter du personnel technique de haut niveau, aussi les entreprises ont-elles utilisé tous les moyens à leur

disposition pour répondre à leurs besoins. Le Royaume-Uni, où les entreprises nucléaires offrent des salaires et des avantages alléchants et utilisent un large éventail de méthodes pour attirer de nouvelles recrues, est représentatif à cet égard : promotion classique, recours à des agences spécialisées et à l'Internet. L'utilisation de ce dernier moyen connaît un essor rapide : au Japon, il est courant d'utiliser les sites Web des entreprises pour favoriser le recrutement. Il n'est pas nécessaire de faire appel à des agences spécialisées dans la promotion. En Espagne, une entreprise de formation a été utilisée au cours des trois dernières années pour recruter du personnel d'exploitation habilité. On pourrait peut-être surmonter plus facilement les difficultés de recrutement si l'on comprenait pourquoi de nombreux étudiants sont rebutés par l'industrie nucléaire ou les disciplines scientifiques et techniques en général. Les industriels américains sont allés plus loin que la plupart de leurs homologues pour essayer de déterminer les raisons qui poussent les jeunes ingénieurs à choisir d'entrer ou non dans l'industrie nucléaire. Ils ont également défini la marche à suivre et les éléments que l'on retrouve dans tous les programmes de recrutement et de fidélisation couronnés de succès. Plusieurs pays indiquent que certaines entreprises ont entrepris d'améliorer leur image pour attirer les jeunes les plus prometteurs. Ainsi, une compagnie d'électricité coréenne a créé, conjointement avec les pouvoirs publics, la Fondation coréenne pour l'énergie nucléaire dont la mission est de faire mieux connaître l'énergie nucléaire et sa contribution à la société. Toutefois, l'un des moyens les plus efficaces de persuader les étudiants de choisir l'industrie nucléaire est de leur laisser la possibilité d'en faire directement l'expérience. Outre l'organisation de visites de leurs sites, de nombreuses entreprises offrent des stages et des bourses d'étude.

Les interactions entre l'industrie, d'une part, et les universités et les écoles supérieures techniques, d'autre part, prennent des modalités diverses. Une entreprise belge travaille avec des universités et des écoles supérieures techniques proches sur des projets spécifiques. En outre, elle offre un prix annuel pour couronner le meilleur mémoire de maîtrise dans le domaine nucléaire. Cette forme d'engagement des entreprises est relativement fréquente et donne aux étudiants une image positive de l'industrie. Dans ses efforts pour attirer des éléments de grande valeur, l'industrie nucléaire affronte une vive concurrence des autres secteurs technologiques et l'industrie américaine n'est pas la seule à considérer un mode de coopération plus approfondi et plus structuré, le partenariat, comme un moyen de recruter du personnel tant diplômé que non diplômé. Les entreprises et les universités travaillent souvent de concert pour élaborer et dispenser des cours adaptés aux besoins de l'industrie. Les entreprises britanniques ont non seulement soutenu les quelques cours encore au programme dans le domaine nucléaire, mais elles ont aidé à en introduire de nouveaux. Il est très fréquent que des employés des entreprises donnent des conférences dans le cadre de ces enseignements. C'est également le cas en Belgique où des représentants d'une entreprise, non seulement donnent des conférences, mais aident également les étudiants dans leurs travaux de thèse. En Suède, une université organise et donne des cours selon les indications données par l'industrie. Une entreprise canadienne est allée plus loin et collabore avec des universités pour transformer du matériel technique commercial en matériel pédagogique. L'industrie peut apporter une aide financière. Une entreprise belge contribue au *Belgian Nuclear Higher Education Network*. En Suède, l'industrie participe, conjointement avec l'autorité de sûreté, au financement du Centre suédois de technologie nucléaire pour veiller à ce que les fonds ne manquent pas au moment de remplacer les professeurs partant à la retraite. Il est aussi important d'informer un large éventail d'étudiants des besoins et des défis de l'industrie que de donner des cours à un échantillon réduit. Deux symposiums ont été organisés en Allemagne en 2002 pour renseigner les étudiants sur les débouchés dans l'industrie nucléaire et les inciter à suivre des cours dans ce domaine. Ont participé à ces manifestations non seulement des industriels et des universitaires, mais aussi des représentants des pouvoirs publics et des centres de recherche. Un troisième symposium de ce type s'est tenu en 2003.

Les travaux de recherche et de développement sont menés essentiellement à des fins techniques, mais les projets de R-D sont très souvent considérés comme un moyen efficace de recruter de jeunes

scientifiques. Cela peut passer par le financement d'étudiants de troisième cycle dans les universités, des stages ou des collaborations avec des instituts de recherche. Confrontée à un fléchissement de ses effectifs, l'industrie nucléaire canadienne a commandé un rapport qui devait mieux cerner le problème et proposer des remèdes. La principale recommandation a été de revoir le financement de la R-D nucléaire de façon à améliorer la collaboration entre les universités canadiennes et l'industrie et, ce faisant, accroître l'offre et l'attractivité des enseignements dans le domaine nucléaire.

Le recrutement est généralement déterminé par un plan de relève qui prend en compte la nécessité d'une formation permanente. Ainsi, au Japon, les entreprises manufacturières estiment qu'il est primordial de planifier la relève pour préserver et développer les compétences et les qualifications. Dans tous les pays, l'industrie continue à proposer des programmes de formation rigoureux, qui ne visent pas seulement à répondre à ses propres besoins mais qui vont souvent de pair avec une politique de promotion de carrière. Dans de nombreuses entreprises, la formation est encore dispensée en interne. Une entreprise allemande a créé un centre d'enseignement nucléaire pour renforcer les moyens d'enseignement et de formation en interne destinés à assurer la sécurité d'exploitation des centrales nucléaires. En France, le personnel d'exploitation des centrales nucléaires est recruté au sein d'une population ayant une formation technique générale puis est formé sur le tas par l'entreprise nationale d'électricité. Le poids important du secteur nucléaire, qui possède ses propres organisations de recherche, garantit le renouvellement continu de formateurs expérimentés. Cependant, le recours à des entreprises extérieures pour dispenser des formations est une pratique largement répandue. L'Espagne fait appel à une entreprise de formation, non seulement pour recruter du personnel d'exploitation habilité, mais aussi pour normaliser le processus de formation. Pour répondre aux besoins de formation théorique spécifique des ingénieurs ayant une formation de base plus générale, l'industrie nucléaire suédoise a mis au point des cours de formation nucléaire appliqués, dispensés dans les entreprises mêmes par une société en participation. En Corée, une compagnie d'électricité a mis sur pied des programmes de formation et d'enseignement à moyen et à long terme couvrant aussi bien les aspects administratifs que techniques, qui font appel aux services d'instituts tant nationaux qu'étrangers.

De nombreuses entreprises investissent dans des systèmes de gestion des connaissances, en général comme un moyen de préserver les informations lors du départ d'employés expérimentés. À cet égard, on peut citer la Hongrie, où en raison du profil démographique des employés et de la prolongation de la durée de vie de l'unique centrale nucléaire, la gestion des connaissances est devenue une question primordiale. En Finlande, l'industrie a contribué au rapport du gouvernement sur la gestion des connaissances nucléaires dans la perspective de la construction d'une nouvelle installation. Un groupe de travail a été chargé d'élaborer et d'organiser une formation professionnelle de niveau supérieur en matière de sûreté nucléaire à destination des nouvelles recrues et du personnel en place changeant d'affectation, ainsi qu'à la nouvelle génération qui prend la relève du personnel partant à la retraite.

Bien que les politiques gouvernementales soient généralement difficiles à infléchir, dans la plupart des pays les industries nucléaires ne renoncent pas à réclamer des aides gouvernementales accrues, en particulier en ce qui concerne les programmes de recherche et d'enseignement.

Initiatives des instituts de recherche

Les instituts de recherche éprouvent des problèmes de recrutement analogues à ceux de l'industrie. En outre, leur situation financière se dégrade dans de nombreux pays en raison de la diminution des financements publics et de la vive concurrence dans le créneau où ils commercialisent leurs services et leurs produits. Il est donc difficile pour les instituts de recherche de mettre en œuvre

la recommandation de l'AEN d'attirer les meilleurs étudiants et les meilleurs collaborateurs en élaborant des projets de recherche dynamique susceptibles d'intéresser l'industrie.

Bien que le volume de l'aide publique aux instituts de recherche ait le plus souvent baissé, il demeure dans la plupart des pays non négligeable. Les exceptions sont le Royaume-Uni, où il n'existe plus d'institut de recherche, et la Suède, où l'Institut de recherche doit désormais fonctionner presque entièrement sur une base commerciale.

Dans la plupart des pays, les instituts de recherche ont des liens avec les universités. Ces liens peuvent se traduire par l'élaboration ou l'organisation de cours, l'octroi de prix, de dons ou de bourses, des offres de stages ou la possibilité pour des étudiants d'effectuer des recherches dans des laboratoires bien équipés. Ces activités mettent des étudiants non diplômés et diplômés en contact avec les instituts de recherche d'une manière qui ne peut que favoriser l'emploi dans l'industrie sinon dans les instituts de recherche eux-mêmes. À cet égard, on peut citer la Corée où existe de longue date un programme de stages entre un institut de recherche et une université. Les étudiants mènent des recherches à l'Institut et suivent des cours à l'université. L'objectif du programme est de former la prochaine génération de chercheurs et d'encourager la coordination entre l'institut et l'université. Les stages débouchent souvent sur un emploi.

Les contacts des universités peuvent être plus ou moins structurés. Aux États-Unis, les laboratoires nationaux concluent des accords avec des universités nationales ou étrangères. En France, les institutions spécialisées dans l'enseignement et la formation nucléaires travaillent en collaboration étroite avec les instituts de recherche et l'industrie depuis de nombreuses années. Nul doute que l'initiative récente du Canada de forger une alliance nationale entre les universités, les compagnies d'électricité exploitant des centrales nucléaires, les instituts de recherche et les autorités de sûreté aura des répercussions très positives sur les instituts de recherche de ce pays.

Comme toutes les autres organisations touchant au nucléaire, les instituts de recherche doivent dans la plupart des pays projeter une image positive pour surmonter les préventions des étudiants et du public. On peut souvent y parvenir en mettant en avant les activités qui suscitent une large adhésion ou ne prêtent pas à controverse, telles que les applications médicales ou la recherche fondamentale dans le domaine de la physique, par exemple. L'organisation de visites dans les institutions de recherche est aussi un bon moyen de gagner les esprits. Elles peuvent aussi déclencher chez les étudiants, tant à l'école qu'à l'université, l'envie de mener des recherches dans le domaine nucléaire.

Exemples de bonnes pratiques

- **Collaboration entre universités à l'échelon national**

En Allemagne, un certain nombre d'universités ont créé un réseau de compétences dans le domaine de la technologie nucléaire. En Belgique, cinq universités, en collaboration avec le Centre belge de recherche nucléaire, ont fusionné deux programmes de troisième cycle en un seul, enseigné en anglais.

- **Utilisation de l'Internet**

Au Royaume-Uni, un site Web qui recense la totalité des cours universitaires ayant un contenu nucléaire a effectivement attiré des étudiants. En Allemagne, et dans plusieurs autres pays, la nouvelle génération d'enseignants dialogue avec les étudiants par l'intermédiaire de sites Web. En Italie, de nombreux professeurs ont leur propre page Web au moyen de laquelle ils donnent aux étudiants des informations sur les cours dans le domaine nucléaire. Dans les universités

américaines le téléapprentissage est bien ancré dans les usages et l'Internet est un moyen parmi d'autres au service d'une conception souple de l'enseignement. Au Japon, il est de pratique courante d'utiliser les sites Web des entreprises pour favoriser le recrutement.

- **Formation du personnel en place et recrutement de nouveaux collaborateurs**

La R-D joue un rôle important dans la formation du personnel et les transferts de connaissances. Non seulement la collaboration avec les universités et les instituts de recherche stimule les échanges de personnel au bénéfice de tous, mais elle favorise également le recrutement. Une entreprise britannique a conclu avec les universités un certain nombre d'accords de recherche qui permettent de financer un effectif d'environ 150 personnes qualifiées en milieu universitaire.

III. RESSOURCES HUMAINES

Introduction

Dans l'éventualité d'un fléchissement des effectifs dans leurs industries nucléaires, de nombreux pays membres de l'AEN ont lancé des études pour déterminer l'ampleur du problème. Malgré la multitude des initiatives en cours en faveur de l'enseignement et de la formation dans le domaine nucléaire, ces enquêtes nationales montrent que le nombre des ingénieurs et des scientifiques diplômés dans les disciplines nucléaires est insuffisant pour répondre à la demande.

Dans beaucoup de pays, la désaffection persistante des étudiants pour la science, l'ingénierie et les matières technologiques a entraîné ces dernières années une baisse de la proportion des étudiants diplômés dans ces domaines. Les diplômés de grande valeur dans les disciplines techniques se faisant toujours plus rares, ils sont de plus en plus recherchés et l'industrie a commencé à en pâtir. C'est un sujet de préoccupation pour l'industrie nucléaire, car la majorité des scientifiques et des ingénieurs qu'elle emploie n'ont pas reçu un enseignement spécialisé dans le domaine nucléaire.

Outre cet effet direct, l'industrie souffre aussi indirectement, car la capacité des organisations à palier la pénurie de diplômés dotés d'un bagage solide dans le domaine nucléaire en recrutant des diplômés techniques de haut niveau et en les formant en interne se trouve également compromise.

Dans une certaine mesure, la situation en matière de ressources humaines peut être améliorée par la mobilité des chercheurs et des experts. La mobilité est souvent perçue comme un élément important de l'enseignement et de la formation d'un individu, d'une part, et comme un moyen efficace de faire face à une surcharge de travail ponctuelle ou de transférer des connaissances, d'autre part. Cependant, il se pourrait que la mobilité des chercheurs ne soit pas à la hauteur des attentes car chaque organisation s'efforce de la pratiquer à son avantage.

Offre et demande

Ces dernières années, un certain nombre de pays membres de l'AEN ont lancé des études sur la main-d'œuvre pour évaluer leurs besoins futurs et leur aptitude à les satisfaire. On trouvera ci-après les principales conclusions des rapports nationaux de l'Allemagne, la Corée, les États-Unis, la Finlande, le Royaume-Uni et la Suède, complétées par les données recueillies dans la présente étude. Ces pays sont particulièrement intéressants car, regroupés, ils sont représentatifs des trois principales étapes du cycle de l'énergie nucléaire : expansion, expectative et désengagement.

Tableau 1. **Situation de l'énergie nucléaire dans quelques pays de l'AEN**

Expansion	Expectative	Désengagement
Canada, Corée, États-Unis, Finlande, France et Japon	Espagne, Hongrie, Mexique, Pays-Bas, République tchèque, République slovaque, Royaume-Uni et Suisse	Allemagne Belgique, Italie et Suède

Pendant l'automne 2000, le ministère finlandais du Commerce et de l'Industrie a publié le rapport d'une étude sur la gestion des connaissances nucléaires en Finlande, dont l'objectif était de définir des mesures destinées à favoriser le maintien des compétences nucléaires à un niveau élevé dans l'immédiat et à plus long terme. L'étude comprenait notamment une estimation de l'offre et de la demande de personnel nouvellement qualifié. L'ensemble des acteurs concernés, à savoir l'autorité de sûreté, les centres de recherche, les universités et les compagnies d'électricité ont contribué à ce travail. Au moment de la réalisation de l'étude, la décision de construire une nouvelle centrale n'avait pas encore été arrêtée. Quand l'annonce en a été faite, en automne 2002, les compagnies d'électricité et l'autorité de sûreté ont refait le point de la situation et lancé un certain nombre de nouvelles initiatives à court terme.

Selon le rapport, la pyramide des âges dans la plupart des organisations est telle que le nombre de départs à la retraite doublera, voire triplera, dans les cinq à dix ans à venir. Cependant, les moyens d'enseignement et de formation existants sont jugés suffisants pour combler les vides. Cette bonne adéquation de l'offre et de la demande s'explique par la collaboration étroite entre les centres de recherche, l'autorité de réglementation et les compagnies d'électricité, d'une part, et les universités, d'autre part. Un cours récemment organisé en Finlande illustre de façon exemplaire cette collaboration. Les compagnies d'électricité, l'autorité de sûreté (STUK), le Centre de recherche technique (VTT) et le ministère du Commerce et de l'Industrie, tous acteurs dans le processus d'autorisation et de construction d'une nouvelle centrale nucléaire, ont organisé un nouveau stage à plein temps d'une durée de six semaines à l'intention de l'ensemble du personnel recruté récemment par chacun d'entre eux. Le cours a été coordonné par une université et la plupart des conférenciers étaient des experts appartenant aux organisations participantes. La structure et le contenu général du cours étaient l'oeuvre de l'AIEA, mais ils ont été adaptés aux besoins de la Finlande.

On peut aussi s'assurer les services de personnel spécialisé en réemployant des personnes qui ont une formation dans le domaine nucléaire, mais qui ont quitté le secteur. On en trouve un exemple dans l'expérience de la compagnie d'électricité finlandaise TVO, en liaison avec la construction d'une nouvelle centrale nucléaire. Cherchant à recruter 24 personnes, l'entreprise a reçu 658 candidatures. Parmi les candidats, il y avait 15 titulaires d'un diplôme nucléaire qui avaient travaillé antérieurement dans le secteur nucléaire et souhaitaient y retourner. C'est un nombre non négligeable, correspondant en fait au nombre annuel de diplômés en génie nucléaire.

En Allemagne, a été créée en mars 2000 une Alliance des compétences en technologie nucléaire (*Kompetenzverbund Kerntechnik*) à laquelle adhèrent les principaux centres de recherche nucléaire et les universités qui en sont géographiquement proches. Dans un premier temps, l'Alliance a réalisé une étude des besoins futurs et de la structure démographique des spécialistes en technologie nucléaire employés par les compagnies d'électricité, les industries manufacturières et de services, ainsi que par les organismes responsables de la sûreté et de l'octroi des autorisations. Simultanément, une estimation des moyens éducatifs des universités, y compris le nombre d'étudiants inscrits dans des disciplines nucléaires, a également été effectuée.

En Allemagne, on anticipe une baisse d'environ 10 % du nombre d'ingénieurs travaillant dans le secteur nucléaire au cours de la prochaine décennie. Les besoins estimés de nouveaux ingénieurs, en grande partie pour combler les départs, se situent aux alentours de 25 % de l'effectif total dans le secteur – sur la base de la politique en vigueur prévoyant un démantèlement de toutes les centrales nucléaires après 40 ans d'exploitation. Compte tenu de ces prévisions, il est encourageant de noter, dernièrement, une légère augmentation du nombre de diplômes décernés annuellement en génie mécanique et électrotechnique. En outre, le nombre de diplômes en génie nucléaire délivrés récemment correspond aux besoins annuels moyens. Toutefois, si la tendance actuelle se maintient, on peut craindre une sérieuse pénurie de compétences nucléaires avant la fermeture de la totalité du parc électronucléaire.

Chaque année, le ministère coréen de la Science et de la Technologie (MOST) réalise une étude pour faire le point de la situation dans le secteur nucléaire. Bien qu'il s'agisse en premier lieu de faire un tour d'horizon du secteur, l'étude couvre la main-d'œuvre, l'enseignement et la formation dans le domaine nucléaire. En 2003, le MOST a approfondi particulièrement ce dernier sujet en finançant une étude sur la situation de la main-d'œuvre dans les industries, les instituts de recherche et les établissements d'enseignement nucléaires coréens.

L'étude a montré que le personnel des organisations coréennes liées au secteur nucléaire reposait sur une base démographique particulièrement étroite, la tranche d'âge comprise entre 36 et 40 ans formant de loin la cohorte la plus importante et la tranche comprise entre 41 et 45 la deuxième. En raison de la récession économique des dernières années, les organisations ont ralenti les recrutements, d'où une aggravation de cette tendance.

Du fait de cette pyramide des âges, seul un petit nombre d'experts nucléaires atteindront l'âge de la retraite dans les dix à quinze prochaines années. Cependant, comme on table sur une persistance du très faible taux de recrutement enregistré lors des cinq à dix années passées, le renouvellement pourrait s'avérer très problématique au-delà de cet horizon. S'agissant plus précisément des compétences, l'étude a montré que pendant les cinq années à venir environ 20 % des ingénieurs nucléaires prendront leur retraite. Par conséquent, les ingénieurs nucléaires seront très probablement remplacés par des ingénieurs d'autres disciplines.

En 2001, le Service suédois d'inspection de l'énergie nucléaire (SKI) a réalisé une étude des domaines de compétences stratégiques pour chiffrer les besoins présents et futurs à échéance de dix ans. L'étude a également évalué dans quelle mesure les universités et les instituts de technologie couvraient bien toute la gamme des spécialités nucléaires. Onze spécialités parmi lesquelles la physique des réacteurs et du cœur, la technologie du combustible, le génie nucléaire et le contrôle de processus, ont été définies. Les compagnies d'électricité, les autres grands acteurs industriels et l'autorité de sûreté ont participé à cette étude.

Selon le rapport, la répartition des âges des employés dans les organisations participantes est telle qu'il y a peu de risque que les départs à la retraite au cours des cinq à dix prochaines années entraînent la perte de vastes pans de compétences. En outre, les changements dans les besoins de personnel par spécialités sont généralement faibles. Au total, on estime qu'une cinquantaine de personnes sont recrutées chaque année et que les universités suédoises ont les moyens éducatifs suffisants pour faire face à cette demande. Cependant, des initiatives telles que celles décrites dans le chapitre II sont nécessaires pour maintenir ces moyens dans l'avenir.

D'après un rapport commandé par le gouvernement du Royaume-Uni en septembre 2001 et publié l'année suivante, les besoins de recrutement des sous-secteurs de l'industrie nucléaire que sont la production d'électricité, le combustible, la défense et la décontamination sont actuellement satisfaits, mais il devient de plus en plus difficile de trouver des candidats qualifiés. Le rapport relevait un certain nombre de domaines de qualifications préoccupants, à savoir : protection radiologique, radiochimie, rédaction de dossiers de sûreté, évaluation de la criticité et recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire.

On estime à un millier de diplômés par an pendant les quinze années à venir les besoins des sous-secteurs de la production d'électricité, du combustible, de la défense et de la décontamination ; actuellement le taux de recrutement se situe aux alentours de 560. Sur ce millier de diplômés, 700 viendraient compenser les départs à la retraite et 300 permettraient de faire face à la croissance des besoins du sous-secteur de la décontamination. Compte tenu des connaissances et des qualifications requises, la majorité de ces nouvelles recrues seraient diplômées en ingénierie et en sciences physiques.

Cependant, la désaffection des étudiants à l'égard de ces disciplines s'est traduite par une baisse des inscriptions de 26 % au cours des huit années précédant l'année 2001. Faute de renverser cette tendance, le secteur nucléaire et radiologique pourrait être contraint de chercher à recruter l'équivalent de 10 % de l'ensemble des diplômés en ingénierie et en sciences physiques dans les dix ans à venir alors qu'à l'échelon national le secteur nucléaire emploie moins de 1 % de la main-d'œuvre spécialisée dans l'ingénierie.

En outre, l'enseignement nucléaire dans les universités britanniques se trouve dans une situation extrêmement précaire. Il n'existe aucun cours de premier et de deuxième cycles ayant un contenu nucléaire significatif. Au niveau supérieur, seuls subsistent quatre enseignements de maîtrise entièrement dédiés au nucléaire débouchant sur la délivrance d'une quarantaine de diplômes chaque année. L'industrie nucléaire est donc tributaire du recrutement de diplômés techniques de bon niveau qu'elle forme ensuite en interne.

Outre les diplômés, il faudra environ 8 000 ouvriers qualifiés au cours des quinze prochaines années, d'où la nécessité d'élaborer des programmes d'apprentissage. Cependant, le Royaume-Uni ne dispose pas actuellement de système efficace dans ce domaine. Au total, on estime que dans les quinze années à venir, les sous-secteurs de la production d'électricité, du combustible, de la défense et de la décontamination auront besoin d'embaucher quelque 28 000 personnes, sous réserve qu'aucune nouvelle installation ne soit construite. Le chiffre passe à environ 50 000 si l'on inclut le sous-secteur de la santé.

Confrontée à la difficile nécessité d'assurer une offre adéquate de main-d'œuvre expérimentée et qualifiée, l'industrie nucléaire a conjugué ses efforts avec les industries d'extraction pétrolière et gazière, de fabrication de produits chimiques et du pétrole, qui rencontrent des problèmes analogues, pour constituer le Sector Skills Council (SSC). Le SSC encouragera les employeurs dans l'industrie nucléaire à collaborer pour définir les besoins de main-d'œuvre à l'échelle nationale de préférence à celle de l'entreprise et à déterminer les pénuries actuelles et latentes de main-d'œuvre qualifiée. Les instituts d'enseignement et de formation n'auront affaire qu'à un seul interlocuteur dont les messages clairs devraient faciliter la mise au point et l'enseignement de cours appropriés. L'élément moteur sera la demande plutôt que l'offre.

Étant donné l'importance accordée à la décontamination au Royaume-Uni, il est vraisemblable que les besoins de la nouvelle agence non gouvernementale, l'Autorité chargée du démantèlement nucléaire, influenceront fortement l'évolution des qualifications dans le domaine nucléaire au Royaume-Uni.

En 2000, le Comité consultatif pour la recherche sur l'énergie nucléaire (*Nuclear Energy Research Advisory Committee – NERAC*), qui émet des avis à l'intention du ministère de l'Énergie des États-Unis (DOE), a publié un rapport sur l'avenir des programmes universitaires en génie nucléaire et des réacteurs universitaires de recherche et de formation. Selon ce rapport, le nombre de diplômes en génie nucléaire décerné chaque année aux États-Unis a chuté de près de 75 % entre 1980 et 1998, d'où un déséquilibre en l'offre et la demande d'ingénieurs nucléaires en faveur de cette dernière. Le rapport avance quelques recommandations visant à préserver les ressources humaines dans le secteur nucléaire.

Ces dernières années, le DOE a lancé quelques initiatives pour remédier aux problèmes soulevés par le rapport du NERAC. Depuis la parution du rapport, la tendance a été inversée et les inscriptions ont plus que doublé au cours des cinq dernières années. Cependant, ce taux d'augmentation des inscriptions pourrait ne pas être suffisant pour satisfaire les besoins de main-d'œuvre en cas de lancement d'un nouveau programme de construction. La relative stabilité du nombre de diplômes de troisième cycle délivrés chaque année est encourageante, mais le nombre de diplômes en ingénierie en général a légèrement baissé, comme dans beaucoup d'autres pays membres de l'OCDE.

Les enquêtes nationales montrent que les employeurs ont besoin de plus d'ingénieurs et de scientifiques ayant un bagage nucléaire qu'il n'y a de diplômés correspondant à ce profil. Rapportée au nombre d'ingénieurs mécaniciens diplômés chaque année dans des pays tels que la Finlande, l'Allemagne, le Royaume-Uni et les États-Unis, la proportion d'ingénieurs et de scientifiques qui obtiennent un diplôme en sciences nucléaires est inférieure à 1 %. Elle est nettement plus élevée en Corée où elle atteint 13 %. Pourtant, on estime que parmi les nouveaux ingénieurs et scientifiques travaillant dans les secteurs nucléaires de ces pays, il faut environ 30 % de spécialistes du nucléaire et 70 % de spécialistes d'autres disciplines.

Le fait que la majorité des spécialistes travaillant dans le secteur nucléaire ne possèdent pas de diplôme dans cette discipline met en relief l'importance d'une formation et d'un enseignement complémentaires sur le tas. À cet égard, la collaboration entre l'industrie et le monde universitaire peut s'avérer mutuellement avantageuse. En fait, au cours des dernières années, l'industrie a accru son engagement dans l'enseignement et la formation scientifiques.

L'étude précédente de l'AEN a montré que dans beaucoup de pays, la moyenne d'âge des enseignants dans les universités était plutôt élevée. Cette situation, conjuguée à la baisse du nombre des étudiants suivant des cours dans les disciplines nucléaires, a fait craindre que les membres les plus âgés du corps enseignant ne soient pas remplacés au moment de leur départ en retraite. Récemment, quelques exemples encourageants ont été signalés, par exemple en Suède, où les postes des professeurs partant en la retraite ont été maintenus et où des successeurs ont été nommés. Le plus souvent, cela n'aurait pas été possible sans une collaboration entre l'industrie et le monde universitaire.

Les pays qui ont des programmes de propulsion navale et d'armement nucléaires dans leur secteur de la défense, comme la France, le Royaume-Uni et les États-Unis, ont une source supplémentaire d'enseignement nucléaire. La caractéristique de l'armée est un renouvellement permanent de la main-d'œuvre qui alimente un besoin constant de sang neuf et génère une source régulière de personnel formé et expérimenté. Le secteur de l'électronucléaire peut profiter des activités du secteur de la défense de plusieurs manières. Les spécialistes formés par le secteur de la défense peuvent constituer un réservoir important de travailleurs instruits et formés ; les organismes d'enseignement et de formation militaires peuvent partager leurs ressources avec leurs homologues civils pour dispenser des cours ; enseignants civils et militaires peuvent se prêter mutuellement main forte en cas de besoin.

Mobilité

La mobilité internationale des travailleurs hautement qualifiés, notamment les Ressources humaines consacrées à la science et à la technologie est un sujet qui préoccupe actuellement beaucoup les pouvoirs publics dans la plupart des pays de l'OCDE. Pour atténuer les pénuries éventuelles, un nombre croissant de pays mettent en œuvre des mesures destinées à faciliter le recrutement de travailleurs étrangers qualifiés. Les effets bénéfiques pour les pays d'accueil sont la stimulation de la capacité d'innovation, un renforcement des ressources humaines et la diffusion internationale des connaissances. Pour les pays de départ, la perte de ressources humaines peut être au moins partiellement compensée par le retour des migrants et la constitution de réseaux facilitant la circulation de travailleurs qualifiés entre leurs pays hôtes et leurs pays d'origine. La mobilité des travailleurs qualifiés peut également favoriser l'investissement dans la formation, tant dans les pays d'origine que dans les pays d'accueil.

D'après les réponses reçues dans le cadre de la présente étude, la mobilité des chercheurs est en réalité plutôt limitée (tableau 2). Apparemment, si les organismes de recherche sont peu enclins à envoyer leurs propres experts hors des frontières, en revanche, ils accueillent volontiers les chercheurs étrangers. Ainsi, les organismes espagnols n'envoient pas leurs chercheurs à l'étranger, et pourtant on y trouve un fort pourcentage de chercheurs étrangers dans certaines disciplines. De même, le nombre des chercheurs suédois envoyés à l'étranger est symbolique, mais dans certaines disciplines, comme la gestion des déchets, ce pays accueille un contingent important de chercheurs étrangers.

Les données obtenues étaient circonscrites aux chercheurs qui passent une période limitée à l'étranger, quelques années au maximum. Faute de la moindre information sur ceux qui s'expatrient durablement, il est impossible de tirer de conclusions concernant la mobilité générale des chercheurs ou l'ampleur de ce phénomène. Cependant, on peut estimer, qu'au total, la mobilité dans le secteur nucléaire n'est pas différente de ce qu'elle est dans d'autres secteurs technologiques, autrement dit, la migration se produit essentiellement des pays moins développés vers les pays membres de l'OCDE, plutôt que d'un pays membre de l'OCDE à un autre.

Tableau 2. **Mobilité des chercheurs*** (%)

Discipline	Allemagne	Universités japonaises	Organismes de recherche japonais	Espagne
Conception du réacteur	–	0	3	10
	10	10	8	0
Études sur les matériaux	5	0	0	0
	25	33	3	0
Études sur le combustible	–	0	1	20
	–	13	1	0
Gestion des déchets	1,5-5	0	1	10
	3-26	0	3	0
Démantèlement	–	0	0	0
	29		0	5
Radioprotection	–	0	0	15
	–	0	2	0
Autres	3	0	–	–
	5-10	2	2	–

* La valeur indiquée dans la première ligne correspond au pourcentage de chercheurs travaillant temporairement à l'étranger ; la valeur indiquée dans la deuxième ligne au pourcentage de chercheurs étrangers (pourcentage de personnes-années).

Exemples de bonnes pratiques

- **Intégrer l'enseignement et la formation à la R-D**

L'enseignement et la formation sont l'un des domaines thématiques du 6^{ème} Programme-cadre de R-D Euratom. L'objectif est de définir une approche harmonisée en ce qui concerne l'enseignement dans le domaine des sciences et du génie nucléaires et d'apporter un soutien sous la forme de bourses, de réseaux de formation et de subventions pour de jeunes chercheurs. L'enseignement et la formation sont également l'un des principaux objectifs des programmes de recherche nationaux de la Finlande.

- **Faire collaborer l'industrie, les universités et les instituts de recherche**

Une entreprise belge travaille avec des universités et des écoles techniques supérieures locales sur des projets spécifiques. Les entreprises britanniques conjuguent leurs efforts avec les universités pour créer de nouveaux enseignements et soutenir les cours nouveaux et existants en fournissant des conférenciers et en procurant des emplois à des étudiants. L'initiative canadienne UNENE – Réseau d'excellence universitaire en génie nucléaire – transcende les frontières traditionnelles en vue d'assurer une offre durable d'ingénieurs et de scientifiques qualifiés pour répondre aux besoins de l'industrie nucléaire canadienne. En Suède, l'industrie cofinance, avec l'autorité de sûreté, le Centre de technologie nucléaire pour veiller à ce que les fonds ne manquent pas au moment de remplacer les professeurs partant à la retraite.

- **Encourager la mobilité des jeunes chercheurs**

Une université belge demande à ses futurs diplômés de passer une année dans une institution nucléaire étrangère dans le cadre de leur formation en génie nucléaire. En Corée, les étudiants particulièrement brillants reçoivent une subvention pour une mission dans une installation à l'étranger. Une université hongroise a noué des liens avec d'autres universités et instituts de recherche européens, donnant ainsi à ses étudiants la possibilité de poursuivre une partie de leurs études à l'étranger.

- **Maintient d'installations et d'expertises indépendantes**

Le financement de la R-D par le secteur privé contribue à assurer la pérennité d'un réservoir d'experts et d'installations au sein des universités et des centres de recherche. Un cofinancement est préférable à un financement par une seule entreprise. Aux États-Unis, les membres de l'EPRI et le Owners Group ont décidé de cofinancer un certain nombre de projets. Le financement de l'industrie en faveur de la recherche peut venir en complément du financement public comme c'est le cas en Allemagne, en Corée, en Espagne, aux États-Unis, en Hongrie et au Japon. Dans les pays où le financement public est faible ou inexistant, l'industrie peut prendre directement les choses en main. En 2000, l'industrie nucléaire du Royaume-Uni avait quelque 250 contrats de recherche en cours avec les universités, pour un montant d'environ 10 millions de livres. Depuis 2004, l'industrie électronucléaire finlandaise a dû financer les programmes nationaux de recherche relatifs à la sûreté et à la gestion déchets nucléaires pour permettre aux autorités publiques de disposer d'une capacité d'expertise dans ces domaines.

IV. COLLABORATION INTERNATIONALE

Introduction

La tendance générale à l'internationalisation de l'économie s'est accompagnée d'une intégration plus étroite de l'économie du savoir et d'un essor des transactions dans ce domaine. En conséquence, la production et la mise en œuvre du savoir scientifique et technologique ont pris une dimension plus collective. Pratiquement, toutes les formes de collaboration, telles que la recherche en coopération et les alliances stratégiques internationales, semblent prospérer.

La collaboration internationale en matière de recherche, collaboration industrielle mise à part, peut se décliner sur des modes variées. On en trouvera ci-dessous quelques exemples, classés par ordre de complexité croissante :

1. Collaborations de recherche entre scientifiques individuels. Les tractations peuvent être relativement simples, par exemple un échange de lettres, avec des incidences financières faibles, sinon nulles.
2. Collaborations fondées sur des accords entre institutions de recherche. En principe une approche plus formelle est requise, surtout si les crédits octroyés aux participants proviennent en dernier ressort des pouvoirs publics ou d'organes qui leur sont associés.
3. Collaborations demandant un investissement ou des crédits de fonctionnement non négligeables. Même si les fonds ne franchissent pas les frontières nationales, une approche plus formelle est généralement inévitable, d'où des arrangements plus complexes. Ces collaborations peuvent s'appuyer sur des installations ou une organisation existante ou impliquer l'élaboration d'arrangements inédits.
4. Collaborations destinées à créer un nouvel aménagement durable, par exemple une installation qui ne serait pas à la portée d'un seul pays, nécessitant des accords en bonne et due forme.

Le degré d'engagement des décideurs et des pouvoirs publics sera fonction des circonstances. Au niveau le plus élémentaire (1), aucun engagement n'est généralement requis. Au-delà, les pouvoirs publics sont responsables du maintien d'un cadre général dans lequel peut s'inscrire la collaboration internationale. Dans le cas de la création d'une installation nouvelle à grande échelle mettant en jeu des sommes importantes (4), l'intervention des pouvoirs publics est inévitable.

Les gouvernements nationaux n'accordent leur appui financier que si les objectifs des programmes internationaux sont compatibles avec leur propre stratégie nucléaire. Aucun des pays qui ont répondu au présent questionnaire n'a indiqué frapper explicitement d'interdit la participation à un quelconque programme international. Cependant, les gouvernements financent rarement des programmes de travail qui vont à l'encontre de leur politique nationale.

Collaboration des instituts de recherche

La recherche nucléaire n'a jamais été une activité strictement nationale. La collaboration, l'échange d'informations, voire l'échange de ressources humaines, ont toujours été indissociables de l'essor de l'énergie nucléaire, dans les limites imposées par les impératifs politiques du moment. C'est en grande partie grâce à la coopération internationale que l'énergie nucléaire s'est transformée, en l'espace d'une seule génération, en une source d'énergie fiable qui fournit un pourcentage significatif de l'électricité produite aujourd'hui dans de nombreux pays. Il n'est donc pas surprenant que des liens très fructueux continuent d'unir les pays européens, les États-Unis, la Corée et le Japon, par exemple.

En Europe, l'histoire de la collaboration internationale dans le nucléaire civil remonte à 1957, lorsque l'Allemagne, la Belgique, la France, l'Italie, le Luxembourg et les Pays-Bas ont signé le Traité Euratom dans le but de créer les conditions nécessaires au développement d'une industrie nucléaire florissante en Europe. Le Traité, qui jouit aujourd'hui de l'appui d'un nombre accru de partenaires, demeure le cadre de référence pour les programmes de recherche européens relatifs à la fission et à la fusion nucléaires. Les pays membres versent leurs contributions financières à l'organisation qui, en retour, subventionne les programmes de recherche conjoints de ses membres.

Aux États-Unis, le programme intitulé *Nuclear Energy Research Initiative* (NERI) finance des laboratoires nationaux, des universités et l'industrie. Cependant, la collaboration internationale est encouragée et organisée dans le cadre des programmes I-NERI, sur la base d'un partage équitable des coûts. Chaque partie prenante aux programmes I-NERI subventionne ses propres participants au projet et les États-Unis versent une contribution d'un montant équivalent.

Au Japon, le JAERI subventionne des programmes internationaux sur une base ponctuelle. Une évaluation a priori et une évaluation rétrospective sont effectuées conformément aux pratiques applicables aux collaborateurs nationaux. La JNC coopère activement avec la France, les États-Unis et d'autres pays nucléaires avancés dans les domaines de la technologie nucléaire de pointe et de l'évacuation des déchets de haute activité.

Les programmes de recherche coordonnée de l'AIEA ainsi que les groupes de travail, projets conjoints et échange d'informations de l'OCDE/AEN sont autant de cadres où se déploie la collaboration internationale. Les projets conjoints et les programmes d'échange d'informations permettent aux pays intéressés de poursuivre des recherches, des travaux scientifiques comparatifs ou de mettre en commun des données concernant des domaines ou des problèmes spécifiques. Le Secrétariat de l'AEN patronne et soutient l'exécution des projets, mais les participants supportent la totalité des coûts. Ces projets, qui portent principalement sur la sûreté nucléaire et la gestion des déchets, sont l'un des points forts de l'AEN. Le projet de réacteur de Halden est souvent cité comme l'un des exemples les plus probants de projet conjoint de longue haleine. Une centaine d'organisations représentant 17 pays y participent.

Dans les années 1960-70, la collaboration internationale dans le domaine de l'énergie nucléaire avait pour objet premier d'apporter des réponses aux nombreuses questions qu'a suscitées la mise au point de cette technologie radicalement nouvelle. Les échanges d'informations et les échanges temporaires de personnel, accélérés par les nouveaux moyens de communication et de transport, ont permis d'atteindre un rythme de développement sans précédent.

Les accidents de Three Mile Island et, plus tard de Tchernobyl, ont conduit à mettre l'accent sur la recherche sur la sûreté nucléaire dans les années 1980-90. Une vaste communauté de chercheurs de tous les pays s'attachaient déjà à limiter au minimum les risques résiduels de l'énergie nucléaire et à chiffrer les hypothèses concernant les phénomènes d'accidents graves ; la collaboration internationale

était une sorte de mécanisme d'assurance qualité. Les codes et les données expérimentales étaient comparés pour vérifier leur validité, et les performances des centrales individuelles en matière de sûreté ont été publiées.

Aujourd'hui, la gestion des déchets nucléaires est un champ important de collaboration internationale. En Europe, près de 50 % des programmes de recherche publique concernent la gestion des déchets nucléaires. La collaboration internationale est indispensable pour recenser les diverses possibilités envisageables et choisir la plus rationnelle, déterminer les risques propres à chaque option, ou approfondir des pistes nouvelles et innovantes telles que la séparation et la transmutation.

Bien qu'elle constitue encore un thème hautement prioritaire dans certains pays, la recherche sur la sûreté nucléaire appliquée aux installations existantes occupe une place décroissante dans les programmes internationaux. Ainsi, dans le 6^{ème} Programme-cadre européen, les programmes de recherche sur les accidents nucléaires graves dans les installations existantes ne représentera qu'environ 3 % de l'ensemble des programmes relatifs à la fission nucléaire.

Sauf peut-être en France, le développement de futures centrales nucléaires continue de jouer un rôle secondaire dans les organismes publics européens. Cependant, les nouveaux thèmes de recherche jouissent d'un tout autre degré de priorité aux États-Unis, au Japon et en Corée. Dans ces pays, un pourcentage non négligeable, voire prédominant, des ressources de R-D est consacré au développement et à la conception de centrales avancées innovantes. La collaboration internationale permet une mise en commun des ressources, pratique d'autant plus pertinente qu'un certain nombre d'installations de recherche ont été fermées et que la main-d'œuvre affectée à la R-D a été considérablement réduite.

Un nouveau défi attend la collaboration internationale dans la prochaine décennie. Les scientifiques et les ingénieurs qui ont mis au point et construit le parc nucléaire en place vont prendre leur retraite dans les toutes prochaines années ; il va falloir donner à une nouvelle génération de jeunes ingénieurs nucléaires la motivation, les connaissances et la formation appropriées pour préserver l'avenir de la filière nucléaire. Indépendamment du fait que plusieurs pays ont décidé de renoncer à l'énergie nucléaire, chacun s'accorde à reconnaître qu'il convient de maintenir les compétences en technologie nucléaire. À l'évidence, seul un effort conjoint concerté à l'échelon international peut permettre de former une masse critique de jeunes chercheurs animés du désir de donner un nouvel élan à une technologie menacée dans son existence.

Le Forum international Génération IV est une initiative susceptible de contribuer à résoudre ce problème. Il a réuni l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Corée, les États-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni, la Suisse et l'Euratom qui sont prêts à unir leurs efforts pour développer l'énergie nucléaire de demain. L'AEN a été invitée à assurer le secrétariat technique pour la phase de R-D des activités du GIF. En sélectionnant six concepts possibles concernant la technologie des futures centrales nucléaires, les membres du GIF ont tracé des perspectives claires pour les futures activités de recherche et de développement. Une Feuille de route contribue à structurer la R-D envisagée par disciplines et définit les échéances majeures et les tâches à effectuer. Le GIF est une organisation officielle, patronnée par ses pays membres, chargée de favoriser la collaboration dans la R-D sur les systèmes de quatrième génération. L'objectif du GIF est de mettre au point des systèmes de réacteurs nucléaires d'avenir susceptibles d'être autorisés, construits et exploités de façon à offrir des produits énergétiques fiables et économiquement concurrentiels qui prennent pleinement en compte les préoccupations exprimées par la société civile concernant la sûreté, les déchets et la prolifération nucléaire. L'objectif est d'être en mesure de déployer ces réacteurs à l'échelon international avant 2030.

Au cours des cinq années du 6^{ème} Programme-cadre (FP-6), lancé en 2003, la Commission européenne prévoit de consacrer 190 millions d'euros de son budget Euratom à la collaboration internationale de ses pays membres. La fusion nucléaire est de loin la première priorité du programme. Près de la moitié des ressources visant la fission nucléaire sont affectées à la gestion des déchets radioactifs, notamment la recherche sur l'évacuation dans des formations géologiques, ainsi que la séparation et la transmutation ou d'autres méthodes de réduction des déchets. Les technologies nucléaires, la sûreté nucléaire et la radioprotection tiennent une place à peu près égale dans le programme-cadre.

Collaboration des industries

À l'évidence, le marché concurrentiel impose des limites à la collaboration entre les industries. Néanmoins, les entreprises industrielles internationales ont dû rationaliser leurs structures par des mesures de fusion et d'acquisition pour faire face au rétrécissement du marché des centrales électronucléaires, par exemple l'acquisition par Westinghouse/BNFL de certains secteurs de ABB, ou la fusion de leurs activités nucléaires par Framatome et Siemens. Les nouvelles synergies ont permis à ces entreprises de réduire leurs effectifs tout en maintenant un niveau minimum de compétences nucléaires et, par conséquent, d'assurer leur avenir en tant que fournisseurs d'énergie. Les décisions récentes de donner le feu vert à la construction de réacteurs de type EPR en Finlande et en France atteste le bien fondé de cette stratégie.

En revanche, la recherche préconcurrentielle n'a jamais connu de contraintes, aussi les industries ont-elles collaboré avec les centres de recherche dans la plupart des programmes de recherche énumérés plus haut. Plusieurs entreprises industrielles s'intéressent au GIF. Elles peuvent apporter un complément au financement par les pouvoirs publics, mettre leurs installations d'essai à la disposition du Forum pour des utilisations communes et réaliser des projets de recherche en utilisant leurs propres ressources.

Le FP-6 a pour but de renforcer et d'approfondir la collaboration au niveau des programmes et des projets de façon à optimiser l'utilisation des ressources (qu'il s'agisse des ressources humaines ou des installations expérimentales) et de promouvoir une vision européenne commune des problèmes clés et des stratégies, compte tenu des besoins du secteur de la recherche en Europe. En outre, le FP-6 encourage l'établissement de réseaux avec des pays tiers, notamment les États-Unis, les Nouveaux États indépendants (NEI) de l'ex-Union soviétique, le Canada et le Japon.

Collaboration entre les universités

Alors que les centres de recherche nucléaire pratiquent de longue date la collaboration transfrontière et que l'industrie nucléaire possède une dimension internationale, les possibilités de collaboration entre les universités et des partenaires internationaux sont moins structurées.

Des étudiants se rendent à l'étranger dans le cadre de leur cursus universitaire pour se spécialiser dans un domaine particulier ou pour acquérir une perspective différente et élargir leur expérience. Cette tendance s'est fortement accentuée au cours des quinze dernières années. Cependant, elle est le plus souvent le fait d'initiatives individuelles, facilitées par des systèmes de bourse, qui ne débouchent pas sur des accords ou des arrangements officiels entre universités.

La situation ne semble pas être très différente pour les chercheurs travaillant dans les universités. Cependant, il convient de noter que les réponses au questionnaire ne contenaient que très peu

d'informations sur le rôle des universités dans la collaboration internationale. Cela pourrait tenir au fait que dans la plupart des pays qui ont, ou qui ont eu, un programme nucléaire, il existe des organismes spécialisés dans la recherche nucléaire qui drainent l'essentiel du financement public, d'où une faible présence des universités dans la recherche nucléaire.

Quant à l'enseignement et à la formation, la nécessité pour le secteur nucléaire de recruter une nouvelle génération d'ingénieurs et de scientifiques, et le désintérêt des jeunes pour les disciplines scientifiques et techniques, ont récemment conduit à l'émergence d'une nouvelle stratégie, la création de réseaux d'universités. C'est le cas dans plusieurs pays, notamment la Belgique et le Canada. Ces réseaux doivent permettre une mise en commun des ressources pour proposer des programmes d'enseignement de haut niveau et inciter les étudiants à embrasser des carrières nucléaires. L'industrie nucléaire participe également à ces programmes.

Le FP-6 d'Euratom contient une mesure spécifique intitulée « Enseignement et formation », dont le but est « de mieux intégrer les activités européennes d'enseignement et de formation en sûreté et radioprotection pour lutter contre le déclin à la fois du nombre d'étudiants et des établissements de formation, afin que les compétences et les qualifications nécessaires soient disponibles pour continuer de garantir la sûreté d'utilisation de l'énergie nucléaire et des autres utilisations des rayonnements dans l'industrie et la médecine ». Cette stratégie s'est concrétisée par la création du Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (ENEN) qui réunit 22 universités ou instituts de 17 pays de l'Union européenne ou de pays candidats. L'ENEN prône une harmonisation des programmes nucléaires en Europe et se propose de délivrer un diplôme ENEN qui serait reconnu par l'ensemble des participants. Dans l'immédiat, l'ENEN envisage d'élargir son champ de compétences de façon à couvrir à la fois l'enseignement et la formation.

D'autres accords internationaux ont été conclus récemment en Europe concernant l'enseignement en génie nucléaire : des accords bilatéraux – l'INSTN (France) avec l'ELB (Belgique) ou l'UPN (Espagne) – et des accords multilatéraux – (INT BUTE (Hongrie), TU Delft (Pays-Bas), Université de Dresde et Forschungszentrum Rossendorf (Allemagne)).

À la suite d'une réunion de haut niveau de l'AIEA en juin 2002 sur la « Gestion des connaissances nucléaires », la Corée a organisé une réunion pour lancer le processus de création d'un réseau asiatique pour l'enseignement supérieur en technologie nucléaire (*Asian Network for Higher Education in Nuclear Technology – ANENT*). Les objectifs de l'ANENT sont : promouvoir, gérer et préserver les connaissances nucléaires et assurer la pérennité d'une main-d'œuvre compétente et qualifiée dans le domaine nucléaire dans la région asiatique. Il s'agit aussi de renforcer la qualité des ressources humaines en vue d'assurer la viabilité de la technologie nucléaire et de faciliter la coopération dans l'enseignement supérieur, la recherche associée et la formation en technologie nucléaire dans la région asiatique.

Enfin, la stratégie de réseau a été récemment adoptée à l'échelle mondiale avec le lancement, en septembre 2003, de la *World Nuclear University* (WNU) à l'initiative de la *World Nuclear Association* (WNA).

Exemples de bonnes pratiques

- **Réseaux internationaux d'universités**

Dans le cadre d'initiatives régionales telles que le Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (ENEN) et le *Asian Network on Education and Nuclear Training* (ANENT),

des universités de pays différents se regroupent pour délivrer des diplômes dans des disciplines nucléaires qu'aucune d'entre elles ne pourrait proposer individuellement. La *World Nuclear University* est un exemple de collaboration entre l'industrie et le monde universitaire en faveur de l'enseignement et de la formation. Ces initiatives passent obligatoirement par une mobilité des étudiants, des enseignants et des experts.

- **Garantie d'accès aux compétences nucléaires via les organisations internationales**

De nombreux pays européens encouragent leurs organisations nucléaires à participer aux Programmes-cadres d'Euratom pour accroître leurs capacités d'expertise. Les projets internationaux tels que les Projets conjoints de l'AEN sont un moyen économique d'obtenir des données expérimentales et de maintenir et de développer les compétences nécessaires pour préserver l'avenir de la filière nucléaire. Certaines organisations internationales, comme l'AEN, peuvent également servir de vecteurs à la collaboration – le Projet de réacteur de Halden étant un exemple parmi d'autres.

- **Collaboration internationale**

La collaboration internationale peut dynamiser la R-D. Les Programmes-cadres d'Euratom balayent l'essentiel du spectre des activités nucléaires, depuis les nouveaux systèmes de réacteurs jusqu'au démantèlement des réacteurs en fin de vie. Le GIF, visant le développement à long terme des réacteurs innovants, et l'initiative INPRO, plus axée sur les besoins des utilisateurs, sont deux exemples de R-D en collaboration.

V. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Malgré l'ambivalence de certains pays à l'égard de l'énergie nucléaire et l'intention affichée par d'autres de fermer progressivement leurs installations nucléaires, cette source d'énergie continue de représenter une proportion non négligeable de la puissance installée dans le monde et, au premier chef, dans les pays membres de l'OCDE. Elle permet d'économiser de précieux combustibles fossiles et réduit les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, le champ de la technologie nucléaire dépasse largement la production d'électricité. Il couvre un large éventail d'applications, depuis le diagnostic et le traitement médical jusqu'à l'examen et l'essai de matériaux. Les recommandations ci-après s'inscrivent dans cette perspective globale. Il s'agit de contribuer à la préservation et au développement des compétences dans le domaine nucléaire, indépendamment des applications pacifiques qui pourraient en être faites.

Enseignement et formation dans le domaine nucléaire

Conclusions :

Les pays ont pris acte des problèmes, et des progrès notables ont été accomplis au regard des recommandations du rapport, mais il reste encore du chemin à parcourir.

Il est clair, trois ans après sa publication, que le rapport *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : Faut-il s'inquiéter ?* a fortement marqué les esprits dans la plupart des pays. Surtout, il a indéniablement eu un effet catalyseur. Un certain nombre d'éléments concrets donnent à penser que, sans lui, plusieurs initiatives en cours se seraient essouffées et l'élan indispensable pour en démarrer de nouvelles aurait manqué. Nul doute que ce rapport a conduit plusieurs pays à réaliser des enquêtes pour quantifier plus précisément leurs besoins futurs de main-d'œuvre. Les retombées de ces enquêtes vont au delà des initiatives nationales qu'elles ont déclenchées. Ensemble, elles brossent un tableau plus fidèle de la situation mondiale et ont déjà suscité des collaborations internationales. Les initiatives engagées commencent à améliorer la situation, mais le processus n'en est qu'à ses débuts et il reste du chemin à parcourir.

Bien qu'un large éventail d'activités soient menées dans tous les pays, on n'observe aucun progrès décisif dans les mesures prises pour enrayer l'érosion démographique ; néanmoins, certaines activités ont commencé à faire sentir leurs effets.

Le nombre et la variété des initiatives actuellement en cours laissent entrevoir un début d'amélioration. Toutefois, en dépit du large éventail d'activités entreprises par les pays membres dans lesquels des études démographiques ont été réalisées, celles-ci indiquent toujours une pénurie de personnel qualifié à court terme. Il est particulièrement problématique de recruter et de retenir du personnel spécialisé dans les questions nucléaires, comme la physique du cœur des réacteurs, par exemple. La situation ne fera qu'empirer si la capacité des universités d'enseigner les disciplines nucléaires continue de décliner.

L'enseignement spécialisé nécessaire dans le domaine nucléaire est menacé.

Le secteur ayant atteint la maturité, la demande d'enseignement spécialisé dans le domaine nucléaire est plus faible aujourd'hui qu'elle ne l'a jamais été depuis de nombreuses années, d'où une baisse considérable du nombre d'universitaires proposant des cours dans les disciplines nucléaires. Pourtant, un enseignement spécialisé demeure indispensable si l'on veut garantir la sécurité d'exploitation des centrales.

Recommandations :

Les pays devraient chercher à emprunter les bonnes pratiques des autres pays pour renforcer leurs programmes nationaux.

Si tous les pays ont réalisé des progrès, ceux-ci ont très souvent accompagné l'élargissement et l'évolution logiques des activités existantes. L'un des objectifs de la présente étude est de recenser les initiatives dans l'optique d'un partage des bonnes pratiques. Emprunter des idées à d'autres pays pourrait être une méthode judicieuse pour renforcer et optimiser l'efficacité de l'activité à l'échelon national.

Les pays devraient élargir leur base de connaissances par le biais d'initiatives nationales et internationales.

Il existe une limite au nombre et à la diversité des initiatives à la portée d'un seul pays. Certaines qualifications et compétences éventuellement menacées dans un pays peuvent être beaucoup plus assurées dans un autre. Il faudra pousser plus loin qu'auparavant la collaboration internationale pour préserver toutes les qualifications et les compétences nucléaires dont l'industrie a impérativement besoin.

Les gouvernements, les universités, l'industrie et les organismes de recherche devraient collaborer à l'échelon tant national qu'international pour garantir l'accès aux connaissances spécialisées essentielles dans le domaine nucléaire.

L'utilisation sûre et efficiente de l'énergie nucléaire n'est pas envisageable sans un certain nombre d'experts dans des domaines nucléaires spécifiques : l'ingénierie des réacteurs nucléaires, la physique des réacteurs, la radioprotection, par exemple. Dans certains pays où la demande de spécialistes dans ces disciplines essentielles peut être faible, on risque de voir disparaître les moyens éducatifs nécessaires à leur formation. Il importe donc que les gouvernements, les universités, l'industrie et les organisations de recherche conjuguent leurs efforts pour assurer le maintien de réservoirs d'expertise viables. Les gouvernements doivent définir des orientations stratégiques qui garantissent l'affectation de ressources suffisantes à l'enseignement dans les domaines névralgiques de l'énergie nucléaire. Lorsqu'un pays est partiellement ou totalement dépourvu de compétences propres dans un domaine essentiel, il conviendrait qu'il se tourne vers un autre pays pour pallier cette lacune.

Ressources humaines

Conclusions :

La réalisation d'enquêtes sur la main-d'œuvre est un bon moyen d'évaluer les besoins présents et futurs en matière de compétences.

Avant la publication du rapport *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*, les pays qui avaient une idée claire de leurs besoins de main-d'œuvre présents ou futurs étaient plutôt l'exception. Le rapport a confirmé ce que beaucoup soupçonnaient depuis quelque temps, à savoir que l'enseignement et la formation dans le domaine nucléaire étaient en déclin depuis

plusieurs années et que l'on pouvait sérieusement craindre une pénurie de qualifications dans un avenir proche. Cette incertitude a incité plusieurs pays à évaluer précisément leurs besoins et à prendre des mesures pour s'assurer de pouvoir y faire face.

Attirer dans le secteur nucléaire des diplômés de grande valeur dans les disciplines techniques est une tâche difficile.

La maturité aidant, le secteur nucléaire a développé des domaines de compétences transférables à d'autres industries. En conséquence, une partie de ses effectifs s'est dirigée vers des secteurs en expansion rapide tels que les technologies de l'information. Son remplacement ne devrait pas poser de problème parce que beaucoup des ingénieurs et des scientifiques en question n'ont pas de compétences particulières dans le domaine nucléaire et que les besoins ne représentent qu'une petite fraction du nombre total des diplômés dans ces disciplines. Pourtant, il devient de plus en plus difficile d'attirer des diplômés techniques de grande valeur dans le secteur nucléaire en raison de la concurrence d'autres industries jugées plus intéressantes.

Recommandations :

Une évaluation de la main-d'œuvre à intervalles de quelques années est un bon moyen d'assurer une adéquation optimale de l'offre et de la demande.

Dans un monde en évolution, les besoins de main-d'œuvre et de compétences du secteur nucléaire sont inévitablement appelés à changer peu à peu, quel que soit le pays. Les enquêtes sur la main-d'œuvre contribuent à assurer que l'offre répondra à la demande. Le simple fait de déterminer les domaines dans lesquels le recrutement s'avère difficile en dialoguant avec les responsables des ressources humaines dans les entreprises et les organisations nucléaires aiderait les universités et les instituts de formation à organiser les cours appropriés.

L'industrie et les organismes de recherche devraient dialoguer davantage avec les départements universitaires de science et d'ingénierie pour faire mieux connaître l'industrie nucléaire et amener davantage d'étudiants à envisager cette option au moment de choisir leur carrière.

Compte tenu de l'âpre concurrence que livrent les autres industries scientifiques, techniques et technologiques à l'industrie nucléaire, il incombe à tous ceux qui y travaillent de souligner les défis et les opportunités qu'offre ce secteur. Les étudiants sur le point de choisir leur carrière professionnelle constituent un groupe cible privilégié.

Recherche et développement

Conclusions :

Au cours des dernières années, la R-D nucléaire bénéficiant de fonds publics a baissé dans des proportions considérables dans la plupart des pays.

Il est naturel que les pouvoirs publics réduisent le financement des activités de recherche et de développement d'une industrie parvenue à maturité. Dans certains pays, ce recul a été accéléré par la décision de laisser jouer les mécanismes du marché, dans d'autres, par celle de s'affranchir progressivement de l'énergie nucléaire. De plus en plus, l'industrie finance la recherche du

secteur public pour que les universités et les centres de recherche conservent toujours un certain nombre de spécialistes et d'installations.

La R-D privilégie la sûreté des centrales nucléaires existantes et les questions relatives à la gestion des déchets. L'engagement en faveur de futurs réacteurs innovants est loin d'être prioritaire dans de nombreux pays.

Recommandations :

Il ne faudrait pas laisser le financement de la R-D nucléaire sous contrôle public baisser au point de compromettre le maintien des qualifications et des compétences.

Les responsables du financement de la recherche et du développement dans le domaine nucléaire doivent veiller à ce que les aspects relatifs à l'enseignement et à la formation soient pleinement pris en compte dans les activités.

L'évolution de l'énergie nucléaire est subordonnée à la mise au point de nouvelles centrales innovantes. Un cofinancement public/privé semblerait judicieux.

Collaboration internationale

Conclusions :

La collaboration internationale en matière de recherche nucléaire et

Compte tenu de la raréfaction du financement public, le fardeau de la R-D est retombé sur l'industrie. Comme on pouvait s'y attendre, celle-ci a mis l'accent sur les questions revêtant un intérêt immédiat, telles que la sûreté et la gestion des déchets. Dans un environnement de plus en plus concurrentiel, les fonds mis au service de projets à long terme, tels que les nouveaux systèmes de réacteurs, apparaissent limités.

Dans tous les pays, la logique qui sous-tend le financement public ou sous contrôle public est la nécessité de maintenir les qualifications et les compétences essentielles. Pourtant, le financement public ayant baissé dans la plupart des pays ces dernières années, cette responsabilité incombe de plus en plus à l'industrie. On peut craindre que l'industrie s'en tienne étroitement aux qualifications et aux compétences dont elle a besoin à court terme. Une planification stratégique s'impose pour répondre aux besoins à plus long terme, et cela n'est possible qu'en l'absence de pressions commerciales.

Dans certains pays, s'agissant du nucléaire, le financement de la recherche est indépendant de celui de l'enseignement au sein d'une même université. Dans d'autres, on admet que bon enseignement et bonne recherche vont de pair et le financement est envisagé dans une optique plus intégrée. Certes, accroître le financement de l'enseignement dans le domaine nucléaire aurait des retombées positives sur la recherche, mais il y a davantage de chances qu'une bonne recherche engendre un bon enseignement plutôt que le contraire.

Un pays ne peut pas poursuivre un programme nucléaire, ni même préserver l'avenir de la filière nucléaire, sans un engagement minimum en faveur de concepts de centrale innovants. Étant donné que le pays et le secteur privé en bénéficieront l'un et l'autre, il semblerait judicieux de soutenir les efforts dans ce domaine au moyen d'un cofinancement public/privé.

La collaboration internationale entre les organismes civils de recherche nucléaire remonte aux origines de l'industrie et certains liens établis dans les années 50 existent encore aujourd'hui. La

d'offre de compétences est bien établie et est devenue pour les pays un moyen essentiel d'assumer leurs responsabilités.

Les grands programmes prestigieux de R-D à l'échelle internationale rehaussent l'image du secteur nucléaire et dynamisent le recrutement.

Recommandations :

Les gouvernements, l'industrie et les universités doivent travailler de concert à la création d'un cadre fonctionnel pour soutenir l'enseignement et la formation par le biais d'une collaboration nationale et internationale.

L'AEN et d'autres organismes internationaux doivent faciliter la transférabilité de l'enseignement et des qualifications entre pays membres, en premier lieu dans certaines disciplines nucléaires critiques.

collaboration, sous forme bilatérale et multilatérale, continue de fonctionner de façon efficace, mais les agences nucléaires jouent un rôle croissant dans la coordination des activités internationales, que le thème en soit la recherche ou les compétences.

Le récent Forum international Génération IV (GIF) illustre bien la façon dont les pays et les organisations peuvent conjuguer leurs efforts pour collaborer sur un sujet d'intérêt commun ; en l'occurrence, la mise au point des centrales électronucléaires de demain. Cependant, une fois passés les premiers stades de la recherche, la collaboration de l'industrie peut être limitée par des enjeux commerciaux.

Les programmes de recherche nucléaire novateurs dans le domaine de la séparation et de la transmutation et des futurs réacteurs de puissance (GIF), par exemple, apportent la preuve tangible que la technologie nucléaire demeure stimulante, innovante et porteuse d'avenir. Ces programmes de recherche peuvent influencer sur les sujets enseignés à l'université et donnent aux jeunes sur le point de choisir une carrière une image dynamique de l'industrie.

La collaboration est aussi importante pour l'industrie que pour les universités. On évite non seulement les pénuries de compétences spécialisées, mais aussi la suppression de certains cours. Il existe de bons exemples, tant en Europe (ENEN) qu'en Asie (ANENT), d'universités qui collaborent à la définition de programmes d'enseignement communs au niveau de la maîtrise. Bien que l'initiative de ces collaborations revienne aux universités, il appartient aux gouvernements et au secteur privé de préciser les besoins éducatifs et d'apporter un appui financier.

L'enseignement des disciplines nucléaires à l'université a perdu beaucoup de terrain depuis une dizaine d'années. En conséquence, les pays qui ont recours à la technologie nucléaire ne peuvent plus assurer un enseignement complet de haut niveau dans ce domaine. La collaboration nationale et internationale entre les universités peut permettre d'éviter l'effondrement de l'enseignement dans le domaine nucléaire mais, malheureusement, cette collaboration est peu développée, voire inexistante dans de nombreux pays.

Le principal atout d'organisations internationales telles que l'AEN, l'AIEA et la CE est leur aptitude à créer et à maintenir des cadres dans lesquels les pays membres peuvent travailler de concert et collaborer. De grands progrès ont déjà été accomplis dans les domaines de l'enseignement, de la formation et de la recherche nucléaires et, si l'on veut maintenir le cap, il faut que ces organisations conservent leur rôle de catalyseur dans les diverses formes de collaboration.

Annexe 1

MEMBRES DU GROUPE D'EXPERTS

ALLEMAGNE

M. Thomas SCHULENBERG Forschungszentrum Karlsruhe

BELGIQUE

M. Pierre D'HONDT SCK/CEN
M. Fernand VANMASSENHOVE Université de Gent
M. Philippe MATHIEU Université de Liège
M. Frans MOONS SCK/CEN

CANADA

M. David TREGUNNO EACL

CORÉE, RÉPUBLIQUE DE

M. Bum-Jin CHUNG Cheju National University

ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE

M. John GUTTERIDGE US Department of Energy

FINLANDE

Mme Riitta KYRKI-RAJAMÄKI Lappeenranta University of Technology

FRANCE

Mme Christine FELTIN INSTN
M. Pascal DANNUS CEA
M. Alain GERARD CEA
M. Akli HAMMADI CEA

ITALIE

M. Felice DE ROSA Systèmes nucléaires innovants et cycle du combustible, ENEA

JAPON

M. Masakatsu SAEKI Institut de recherche sur l'énergie atomique du Japon

ROYAUME-UNI

M. Peter D. STOREY, **Président** Health and Safety Executive
M. Tony COVERDALE DTI
M. Chris SQUIRE Health and Safety Executive

SUÈDE

M. Tomas LEFVERT Centre pour la technologie nucléaire

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

M. Yanko YANEV

Département de l'énergie nucléaire

COMMISSION EUROPÉENNE

M. Georges VAN GOETHEM

Fission nucléaire et radioprotection

AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

M. Timo HAAPALEHTO

Division du développement de l'énergie
nucléaire

Annexe 2

BIBLIOGRAPHIE

1. AEN (2000), *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*, OCDE, Paris, France.
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2000/nea2668-education-fr.pdf>.
2. *Nuclear Reactor Safety and Repository Research in Germany*, Report of the Working Group Convened by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), Evaluation Commission, 21 juin 2000.
3. Fritz etc. (2001), *Vorauselender Ausstieg aus der Kernenergie an den deutschen Hochschulen und Forschungszentren*, ATW 46, Heft 2-2001.
4. Wasgindt V. (2003), *Perspektiven in der Kerntechnik: Werben um den Nachwuchs*, ATW 48, Jg. 2003 Heft 2-février 2003, pp. 90-91.
5. Helmers H., Wieland R., Rettig G. (2003), *Das Ausbildungszentrum Kerntechnik der TÜV NORD GRUPPE*, ATW 48, Jg. 2003 Heft 2-février 2003, pp. 116-119.

Des informations pertinentes également à voir dans :

6. OCDE (2003), *Gouvernance de la recherche publique : Vers de meilleures pratiques*, OCDE, Paris, France.
7. AEN (2004), *Gouvernement et énergie nucléaire*, OCDE, Paris, France.
8. OECD (2002), *Science Technology and Industry Outlook 2002*, OCDE, Paris, France.
9. Chung B.J. (2003), *A Policy Study on the Status and Improvement of Korean Nuclear Manpower Demand and Supply*, MOST, 2003.
10. Gutteridge J. (2003), *On the DOE's Assistance to University Nuclear Engineering Programmes*, Nuclear News, septembre 2003.
11. *Statistical Abstract of the USA*, US Census Bureau, 2001.
12. *Kartläggning av strategiska kompetensbehov för kärnteknisk verksamhet i nuläget och för framtiden* (in Swedish). 01:36. Swedish Nuclear Power Inspectorate, 2001.
13. SAFIR *The Finnish Research Programme on Nuclear Power Plant Safety 2003-2006*, General description, <http://www.vtt.fi/pro/tutkimus/safir/paasivu.htm>.
14. Moons F., Safieh J. etc. (2003), *Education and Training in Nuclear Engineering and Safety*, Proceedings of EU Research in Reactor Safety Conference FISA-2003.
15. AIEA (2004), *Groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire. Maintaining Knowledge, Training and Infrastructure for R-D in Nuclear Safety*, INSAG-16, 2004, Vienne, Autriche.
16. Commission européenne (2000), Comité consultatif Euratom-Fission, *How to maintain Nuclear Competence in Europe?*, Bruxelles, Belgique.

17. *Nuclear Education in British Universities*, HSE-NII, February 2002, www.hse.gov.uk/nsd/nuceduc.htm.
18. *Managing the Nuclear Legacy – A strategy for Action*, Government White Paper, juillet 2002, www.dti.gov.uk/energy/publications/whitepapers/index.shtml.
19. *Nuclear and Radiological Skills Study*, DTI, décembre 2002, www.dti.gov.uk/energy/nuclear/skills/nsg.shtml.
20. *Our Energy Future – Creating a Low-carbon Economy*, Government White Paper, février 2003, www.dti.gov.uk/energy/publications/whitepapers/index.shtml.

RÉSUMÉ DES RÉPONSES À LA SECTION DU QUESTIONNAIRE CONSACRÉE À LA R-D

Programmes et projets de R-D en cours

Pour harmoniser la masse d'informations sur la multitude des programmes et projets de R-D en cours dans les pays qui ont participé à la présente étude, cinq disciplines ont été définies (voir questionnaire, annexe 6) : conception des centrales, études sur les matériaux, études sur les combustibles, gestion des déchets et démantèlement.

Depuis les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl, la sûreté d'exploitation de l'industrie nucléaire, qui était une préoccupation importante, a pris une dimension primordiale. L'industrie s'est trouvée mise en demeure par la société civile de répondre à des exigences allant souvent au-delà des obligations découlant des textes juridiques. Ces exigences ont souvent été satisfaites grâce aux travaux de recherche et de développement. Bien que la sûreté ne soit pas considérée comme un sujet à part dans la présente étude, les informations reçues ne laissent subsister aucun doute sur le fait que la sûreté d'exploitation des centrales nucléaires revêt la plus haute importance dans tous les pays et donne lieu à d'intenses activités de recherche et de développement, soit dans le cadre de programmes spécialisés, soit en tant que partie intégrante d'autres programmes. La sûreté sera évoquée plus avant dans le présent chapitre, mais les quelques exemples qui suivent visent à illustrer l'intérêt et le niveau d'engagement pour cet aspect crucial. En Allemagne, la recherche sur la sûreté des réacteurs en exploitation absorbe plus d'un tiers des ressources engagées dans la R-D. Les activités portent sur des expériences de simulation d'une fusion du cœur, le mélange de réfrigérants dans les REP et les processus de combustion de l'hydrogène. En Belgique, le Centre de recherche national aborde la sûreté des réacteurs par le biais de l'optimisation de la configuration du combustible et de la dégradation des internes de cuve. L'Espagne réalise des programmes sur le confinement, les scénarios d'accidents graves, prenant en compte le comportement des produits de fission libérés, et les facteurs humains. Tous les pays ont fait état de programmes de recherche en matière de radioprotection. Ils vont de la surveillance de l'environnement et de la population à l'analyse des faibles concentrations de radionucléides en passant par la réalisation d'études dosimétriques. Le montant des dépenses donne aussi une idée de l'engagement en faveur de la recherche sur la sûreté : entre 1998 et 2002, l'entreprise qui exploite le réacteur nucléaire Paks en Hongrie a quadruplé de budget de R-D concernant la sûreté de son unique centrale nucléaire (de 62,9 à 245,1 millions de HUF) et la Finlande, qui possède deux centrales nucléaires, a consacré en 2003 quatre millions d'euros à son programme national de recherche sur la sûreté des réacteurs.

La conception des centrales fait dans de nombreux pays l'objet d'activités de recherche non négligeables qui visent souvent à améliorer, simultanément, la sûreté et l'efficacité d'exploitation. À cet égard, le cas le plus représentatif est la Hongrie où, mesuré en personnes-années, la conception des centrales arrive au premier rang des priorités de recherche et s'attache à améliorer la sûreté et, dans une moindre mesure, l'efficacité de l'unique centrale nucléaire du pays. Au Royaume-Uni, les activités de R-D consacrées à la conception des centrales mobilisent davantage de personnel que tous les autres domaines de recherche confondus. On observe la même tendance au Japon où la conception des centrales est le premier domaine de recherche et occupe un peu plus d'un tiers des effectifs de R-D. La conception des centrales concerne aussi bien les centrales existantes que les nouvelles

centrales. En Espagne, par exemple, trois projets relatifs à la sûreté visant la conception des centrales existantes sont en cours, deux soutenus par le programme de recherche d'Euratom et le troisième par l'un des organes réglementaires nationaux. Quant aux nouveaux concepts, il est question d'une installation de transmutation des isotopes en liaison avec les déchets nucléaires. En dépit du moratoire qui frappe le nucléaire en Italie, 120 chercheurs, soit juste un peu plus de 10 % du total travaillant dans la R-D nucléaire, sont engagés dans la conception des centrales, y compris celles de nouveaux modèles et de réacteurs avancés. Aux États-Unis, environ 20 % de la main-d'œuvre engagée dans la R-D nucléaire sont affectés à des activités en rapport avec la sûreté et la conception des réacteurs. La Finlande s'intéresse également aux nouvelles technologies applicables aux futurs modèles de réacteurs. En décidant de construire un nouveau réacteur à eau ordinaire de la troisième génération, l'EPR, la Finlande a clairement manifesté son engagement en faveur de l'énergie nucléaire. Mais dans d'autres pays tels que l'Allemagne et la Suède qui ont l'intention d'abandonner progressivement l'énergie nucléaire, la conception de centrales innovantes ne fait l'objet d'aucune recherche. Tous les efforts sont axés sur la sûreté d'exploitation des centrales existantes.

La recherche de nouveaux matériaux n'est pas un domaine d'activité de premier rang dans la majorité des pays. Au Royaume-Uni, au Japon, en Allemagne, en Espagne et aux États-Unis les activités de R-D dans ce domaine occupent moins de 10 % des effectifs travaillant dans la recherche nucléaire. L'Italie consacre également relativement peu de ressources à la recherche de nouveaux matériaux : moins de 5 % des chercheurs sont affectés à cette question. Les principaux thèmes d'études sont liés aux systèmes Pb-Bi, qui retiennent également l'attention en Allemagne. En revanche, ce domaine se place au troisième rang en Hongrie, en termes de main-d'œuvre. Comme dans les autres activités de R-D nucléaire dans ce pays, les travaux sont limités aux réacteurs actuels ; les nouveaux types de réacteurs ne font l'objet d'aucune étude. La Belgique possède l'un des réacteurs d'essai de matériaux les plus puissants ; il est utilisé dans l'examen de matériaux destinés à différents types de réacteurs et au programme européen pour la fusion. En Espagne, les travaux s'inscrivent dans les programmes relatifs à la gestion de la durée de vie des centrales nucléaires en exploitation, et mettent particulièrement l'accent sur l'intégrité des composants, les effets du rayonnement et les phénomènes de corrosion fissurante.

L'ampleur de l'effort de recherche consacré au combustible varie notablement selon les pays. Au Royaume-Uni et aux États-Unis les études sur le combustible occupent environ 10 % des effectifs engagés dans la recherche nucléaire. Au Japon, cette proportion est d'environ 20 % ce qui place cette activité en seconde position après la conception des centrales. Il en va de même en Hongrie. La Hongrie ne travaille pas au perfectionnement des combustibles, mais un institut de recherche national réalise des expériences mettant en jeu du combustible irradié. En Italie, l'engagement dans ce domaine est négligeable, de même qu'en Allemagne. En Espagne, tout comme dans beaucoup d'autres pays, les compagnies d'électricité subventionnent un éventail de projets. Les thèmes classiques d'intérêt sont les taux de combustion élevés et le comportement du combustible en situation normale et accidentelle. En outre, environ 13 % des effectifs travaillant dans les organisations de recherche se consacrent à l'étude des combustibles. La Suède possède une installation d'essai de combustible. En Belgique, un réacteur de recherche est utilisé pour tester des combustibles destinés à différents types de réacteurs. Un grand nombre de pays utilisent le réacteur de Halden de l'OCDE/AEN pour réaliser des études sur les combustibles.

S'ils ne doutent pas que l'industrie nucléaire est sûre et qu'elle fonctionne efficacement, en revanche, tant le public que le monde politique sont souvent sceptiques quant à sa capacité de gérer les déchets nucléaires. Il n'est donc pas surprenant que tous les pays consacrent des ressources importantes à la R-D dans le domaine de la gestion des déchets. En Allemagne, mesuré en personnes-années, c'est le premier domaine d'activité : les programmes portant sur la gestion des déchets absorbent environ 50 % des ressources des organismes de recherche publics. Ces programmes

concernent en premier lieu le stockage final dans des dépôts profonds aménagés dans des formations salines et, dans une moindre mesure la recherche de solutions de rechange telles que la séparation et la transmutation. Aux États-Unis, la R-D consacrée à la gestion des déchets occupe un peu plus de 30 % des effectifs de recherche et, mesurée à cette aune, elle est de loin le domaine d'activité le plus important. Il va de soi que l'autorité de sûreté, la NRC, s'intéresse à la question, mais c'est aussi le cas des universités et du Ministère de l'énergie. En Italie également, quelque 30 % des effectifs de la R-D nucléaire sont engagés dans la gestion des déchets qui est dans ce pays également le domaine d'activité le mieux doté en ressources. Même si elle n'arrive qu'en deuxième position au Royaume-Uni, après la conception des centrales, la gestion des déchets mobilise encore dans ce pays quelque 30 % des chercheurs. En Espagne, plus des deux tiers des ressources disponibles dans les organismes de recherche bénéficiant d'un financement public sont affectés à des programmes de gestion des déchets. Ces programmes portent sur la caractérisation et le conditionnement des déchets de faible et moyenne activité et le stockage du combustible irradié, en particulier dans des dépôts profonds. La gestion des déchets acquiert une importance croissante en Hongrie : des travaux sont en cours depuis 1993 pour déterminer le site d'un dépôt de déchets de faible et moyenne activité, et un projet de recherche concernant le stockage final des déchets de haute activité a débuté en 2004. Au Japon, la R-D sur la gestion des déchets arrive en troisième position, après la conception des centrales et les études relatives au combustible, et elle occupe environ 17 % des effectifs de recherche. La Suède et la Belgique possèdent des laboratoires souterrains ; en Suède, il est implanté dans une formation rocheuse, en Belgique dans une formation argileuse. Toutefois, la Finlande est le premier pays européen qui se prononcera sur l'implantation d'un dépôt définitif. Le pays dispose déjà d'un dépôt de déchets de faible et moyenne activité sur les sites de ses deux centrales nucléaires et des travaux ont débuté en 2004 en vue de la construction d'un laboratoire de recherche souterrain dans le cadre du programme d'implantation d'un dépôt de combustible irradié au même endroit.

Si tous les pays qui ont répondu à la présente étude ont indiqué mener des activités de R-D dans le domaine du démantèlement, c'est un secteur qui ne recueille généralement que des ressources limitées. L'Italie, où près de 30 % des chercheurs sont affectés à des activités de démantèlement, est une exception notable. Au Royaume-Uni, bien que le démantèlement arrive en troisième position en termes d'effectifs engagés, après la conception des centrales et la gestion des déchets, cette activité n'occupe qu'environ 10 % des chercheurs. Les programmes de ce pays visent le démantèlement d'un réacteur rapide, d'un REP prototype et de tranches Magnox. L'engagement est encore plus modeste dans d'autres pays. Aux États-Unis et au Japon, il ne représente que 3 % des ressources de recherche, 5 % en Espagne, et 7 % en Allemagne. En Espagne, ces programmes concernent une usine de fabrication de combustible, une usine de stockage de déchets liquides radioactifs, des laboratoires chauds, une usine de retraitement et un réacteur expérimental. L'Allemagne mène des programmes relatifs au démantèlement non seulement d'une usine de retraitement prototype et de réacteurs à eau ordinaire prototypes, mais également d'un réacteur rapide refroidi au sodium. En Belgique, la déconstruction d'un REP prototype constitue un volet important d'une activité de recherche sur la remise en état des sites. En Hongrie, où le démantèlement de l'unique centrale nucléaire et de l'unique réacteur de recherche n'est pas envisagé à court terme, cette discipline ne génère que peu d'activité.

Tendances de la R-D de l'industrie

Il est difficile de dégager des tendances communes à tous les pays. Il semblerait toutefois que, globalement, l'effort porte davantage sur les réacteurs en exploitation que sur les systèmes futurs. Les projets nationaux prennent le pas sur les projets internationaux. La longueur des projets varie selon les domaines de recherche et les pays : les projets peuvent couvrir le court, le moyen ou le long terme ; il n'y a pas de dénominateur commun. Comme on pouvait s'y attendre s'agissant de la recherche financée par les entreprises, les considérations économiques sont très présentes, mais la sûreté reste primordiale dans tous les pays sans exception.

En Hongrie, la recherche financée par les entreprises est principalement motivée par des considérations de sûreté et se déploie dans des projets visant les réacteurs en exploitation ; les activités relatives aux réacteurs futurs sont négligeables. Les projets à long terme l'emportent sur les projets à court terme. Au Royaume-Uni, les producteurs d'électricité nucléaire participent à un programme de recherche en collaboration sur la sûreté des réacteurs en réponses aux interrogations soulevées par l'autorité de sûreté. Tous les travaux portent sur des réacteurs en exploitation qui, à l'exception d'un REP, sont d'un modèle propre au Royaume-Uni. La plupart des projets s'inscrivent dans un horizon à moyen ou à long terme. Au fur et à mesure que les centrales ferment, et faute de nouvelles installations, on prévoit un déclin progressif de cette activité de R-D au profit des activités relatives aux déchets radioactifs et au démantèlement. En outre, les compagnies d'électricité, de même que la principale entreprise de services, mènent des programmes en interne sur le thème de la sûreté. Au Japon, on relève quelques programmes sur la sûreté en collaboration avec un institut de recherche, bien que le niveau de financement par l'industrie apparaisse plutôt faible. Ces programmes sont variés et portent notamment sur les réacteurs en exploitation, la prochaine génération de REB et la sûreté du combustible. Les projets sont à peu près équitablement partagés entre le long terme et le court terme. En Allemagne aussi, les entreprises ne financent que faiblement les études sur la sûreté réalisées dans des instituts de recherche. La plupart des programmes visent le court terme et portent exclusivement sur les centrales existantes. En Finlande, l'ampleur du financement par les entreprises est restée relativement constante ces dernières années, malgré un léger glissement des priorités de la sûreté nucléaire vers la gestion des déchets.

Outre la sûreté, la recherche par le secteur privé est motivée par des considérations économiques, à savoir l'accroissement des performances des centrales existantes ou le succès anticipé d'un nouveau type de centrale. Au Royaume-Uni, les programmes réalisés en interne par les producteurs d'électricité sont des programmes d'aide à l'exploitation et ils couvrent le court, le moyen et le long terme. Depuis l'achèvement du dernier réacteur en date au Royaume-Uni, les dépenses de R-D à l'appui des futurs systèmes de réacteur ont considérablement baissé. La principale entreprise de services continue de mener des activités de R-D en interne portant sur le cycle du combustible, le démantèlement et la gestion des déchets, mais elles sont largement axées sur les besoins des centrales existantes. Au cours des cinq à dix dernières années, la recherche financée par l'industrie en Belgique a de plus en plus privilégié le court terme et les aspects économiques tiennent une place grandissante dans les projets. Malgré tout, la sûreté demeure le moteur principal de la R-D. Peu à peu, les activités de recherche se sont orientées vers les futurs systèmes de réacteurs, mais les projets relatifs à la sûreté des réacteurs en exploitation sont traités à égalité. Le démantèlement a pris une importance croissante au cours des cinq dernières années. Environ la moitié des projets de R-D sont menés avec des partenaires, le plus souvent européens, et ce mouvement s'amplifie. En Espagne, les projets vont du court au long terme. Le poids des considérations économiques n'est pas occulté, mais un équilibre est recherché avec les questions de sûreté ; la sûreté des centrales est toujours un facteur dans le processus de choix des projets. Quant aux centrales elles-mêmes, il existe des projets concernant aussi bien des systèmes de réacteurs futurs que des réacteurs en exploitation, mais la priorité va plutôt à ces derniers. Le secteur privé participe à des programmes nationaux et internationaux. En Italie, la R-D financée par les entreprises privilégie très nettement la prochaine génération de réacteurs avancés faisant une large place à la sûreté intrinsèque et passive. Il y a également des projets concernant les Systèmes hybrides pour la transmutation des déchets radioactifs à vie longue. Compte tenu de la décision du gouvernement allemand d'abandonner progressivement l'énergie nucléaire, les entreprises financent désormais relativement peu de projets dans les instituts de recherche. Comme cela a déjà été mentionné, il s'agit essentiellement de projets à court terme portant sur la sûreté des réacteurs en exploitation. La R-D concernant les systèmes futurs est essentiellement réalisée en interne par les entreprises. Au Japon, les entreprises financent relativement peu de projets dans les instituts de recherche – la plupart des programmes de R-D font l'objet d'un financement public. Cependant, outre la sûreté, on recense des projets sur la conception des réacteurs, la recherche de nouveaux matériaux,

l'enrichissement, le retraitement et la fabrication de combustibles MOX. Aux États-Unis, la R-D privée est principalement financée par les compagnies d'électricité nucléaire et les entreprises connexes qui détiennent et exploitent des centrales nucléaires. Pour l'essentiel, cet investissement dans la R-D est géré par l'*Electric Power Research Industry* (EPRI), une organisation de R-D en collaboration qui exécute certaines activités de R-D en interne et sous-traite le reste à d'autres spécialistes de la R-D. Le budget est actuellement de 90 millions de dollars des États-Unis. D'autres projets de R-D sont financés par le *Owners group*, dont trois à hauteur de 5 à 10 millions de dollars par an, pour des activités de mise en œuvre et des travaux touchant aux aspects réglementaires et aux procédures d'autorisation.

Financement de la R-D ouverte par les entreprises

La principale raison qui incite les entreprises à financer les activités de R-D ouverte est la même dans la plupart des pays, à savoir assurer la pérennité dans les universités et les centres de recherche d'un réservoir de spécialistes dans les domaines clés. Sans ces spécialistes, il est impossible de procéder à une évaluation indépendante de certaines questions importantes très médiatisées telles que la fiabilité et la sûreté des centrales nucléaires. C'est aussi le moyen pour les entreprises d'avoir accès à des installations spécialisées qui n'existent que dans les universités et les instituts de recherche. À ces aspects techniques, il convient d'ajouter que les experts de ces entreprises jouent un rôle croissant dans l'enseignement et la formation. Cela peut se traduire par l'organisation, en collaboration avec les entreprises, de cours à l'intention du personnel en place, aussi bien pour enseigner de nouvelles disciplines que pour favoriser le recrutement. Toutes ces interventions deviennent de plus en plus cruciales, compte tenu de la désaffection manifestée par les étudiants dans de nombreux pays à l'égard des disciplines scientifiques et la nécessité d'assurer dans les entreprises la relève du personnel spécialisé qui va partir à la retraite.

La R-D ouverte est financée à la fois par les compagnies d'électricité et par les fabricants des centrales. Généralement, l'organisation intéressée finance directement l'université ou l'institut de recherche en application d'un contrat bilatéral. Le financement conjoint est plus efficace et cette formule est bien établie aux États-Unis : les membres de l'EPRI et le *Owners group* s'entendent sur des projets financés en commun, bien que l'EPRI soit le principal bailleur de fonds de la R-D ouverte. Dans tous les pays, l'industrie nucléaire destine ces fonds à des universités nationales ; les exemples de contrats internationaux sont rares.

L'ampleur du financement par les entreprises varie notablement d'un pays à l'autre. En 2000, l'industrie nucléaire du Royaume-Uni avait quelque 250 contrats de recherche en cours avec les universités, pour un montant d'environ 10 millions de GBP. La Compagnie britannique des combustibles nucléaires (BNFL), en particulier, a conclu un certain nombre d'accords de recherche avec des universités. On estime que ces initiatives permettent à elles seules de financer un effectif d'environ 150 personnes qualifiées en milieu universitaire. À l'opposé, certains pays, comme l'Italie et la Belgique, ne subventionnent absolument aucune activité de R-D libre dans les universités.

Dans la plupart des pays, le financement par l'industrie des activités de R-D ouverte ont pour objet de compléter le financement public. Ainsi, l'Allemagne, la Corée, l'Espagne, les États-Unis, la Hongrie et le Japon indiquent que le financement complémentaire apporté par les entreprises peut constituer dans certains cas une contribution non négligeable. En sus de la recherche bénéficiant des fonds publics, les entreprises japonaises financent, en moyenne annuelle, la recherche ouverte à hauteur de 390 personnes-années.

Tendances de la R-D bénéficiant d'un financement public

Alors qu'elle était l'un des secteurs de la R-D les plus florissants dans les années 1970 et 1980, la R-D nucléaire a subi une réduction draconienne du financement public dans de nombreux pays depuis les années 1990. La Corée, où le choix de la filière nucléaire est relativement récent et donc le financement public encore sur une pente ascendante, est une exception. Le Royaume-Uni se trouve dans une situation diamétralement opposée, le gouvernement ayant décidé de se désengager à la fois de l'exploitation directe des centrales nucléaires et de la recherche ; le Royaume-Uni ne possède plus d'institut national de recherche nucléaire. En Italie et en Allemagne, la situation est un peu meilleure : les budgets de R-D octroyés par les autorités publiques ne représentent néanmoins plus maintenant qu'une fraction de ce qu'ils étaient et continuent de décroître. D'autres pays, comme la Hongrie par exemple, font état pour les dernières années d'une stabilisation du financement public, mais à un niveau relativement bas. Les universités japonaises par contre indiquent une faible augmentation du financement public de la recherche nucléaire.

Dans les années 1990, la R-D bénéficiant d'un financement public a privilégié la sûreté des centrales nucléaires en exploitation et les questions relatives à la gestion des déchets. D'ailleurs, ces aspects demeurent les principaux thèmes de la R-D nucléaire dans certains pays européens, par exemple, l'Allemagne, l'Espagne, la Hongrie et la Suède. Cependant, une nouvelle tendance se fait jour : les programmes de R-D concernant les futurs réacteurs innovants. Ce tournant est particulièrement net au Japon et aux États-Unis, mais on observe un certain intérêt pour la conception de nouveaux réacteurs en Espagne, en Italie et en Suède. Indépendamment du sujet, le financement public porte, dans la plupart des cas, sur des questions fondamentales ou génériques plutôt que sur la conception de centrales.

Le financement public n'est pas uniquement cantonné à la R-D nationale. Les pays européens reçoivent une fraction non négligeable de leur financement public via les Programmes-cadres internationaux d'Euratom. Comme la Commission européenne ne prend en charge qu'une partie de l'ensemble des coûts de R-D, elle encourage ses pays membres d'Euratom à dédier une partie de leur financement public national à des programmes internationaux. C'est la raison pour laquelle le financement public en faveur de la collaboration internationale tend à augmenter aujourd'hui en Europe.

Une tendance analogue a été signalée aux États-Unis, où le nouveau programme Génération IV est une excellente illustration d'un programme de R-D intégré, stratégiquement planifié et ciblé, misant sur une collaboration internationale à grande échelle. Dans ce contexte, il convient également de mentionner l'Initiative internationale pour la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire (*International Nuclear Energy Research Initiative – INERI*). Au Japon, le JNC travaille en collaboration étroite avec d'autres pays dans les domaines des technologies nucléaires avancées et du stockage des déchets.

Financement public et expertise

Chaque pays ayant répondu à cette question a mentionné la nécessité d'un financement destiné à maintenir les qualifications et les compétences essentielles au sein du personnel de l'industrie nucléaire. Même dans les pays où les pouvoirs publics ne financent plus la recherche et le développement, comme le Royaume-Uni, on reconnaît le besoin de préserver l'infrastructure. Alors qu'au Royaume-Uni, cette mission est prise en charge par l'industrie et son autorité de contrôle, la *Health and Safety Executive*, dans d'autres pays, elle fait l'objet d'une collaboration entre les pouvoirs publics et l'industrie. En Corée, le gouvernement travaille de concert avec le secteur privé pour préserver les connaissances et assurer le renouvellement des effectifs.

Une grande partie de l'aide est destinée à la réglementation et à la sûreté nucléaires. En Hongrie, l'autorité nationale de sûreté et les institutions de recherche universitaires bénéficient d'un financement public. L'Allemagne accorde un intérêt primordial à la préservation de l'expertise et des moyens de R-D dans les universités et les centres de recherche, ainsi qu'à la construction de nouvelles installations d'essai et au maintien des installations existantes. En Espagne, les fonds publics subventionnent la préservation de l'expertise nucléaire à court et à long terme. En Italie, l'unique groupe de l'ENEA spécialisé dans nucléaire participe à des activités de recherche avec des partenaires nationaux et internationaux pour élaborer et améliorer des concepts dans les domaines de la sûreté et de la gestion des accidents.

Les deux pays où les pouvoirs publics mènent de nouvelles recherches allant au-delà de l'effort requis pour la réglementation et la sûreté sont le Japon et les États-Unis. L'un et l'autre subventionnent la R-D dans les domaines qui comportent un élément d'incertitude irréductible que, traditionnellement, les entreprises ne peuvent pas assumer. En outre, comme dans les autres pays, l'affectation des ressources au maintien des effectifs et des capacités techniques est un moyen de renforcer la réglementation de la sûreté. Les deux pays soulignent également la nécessité de soutenir la recherche à long terme dans les laboratoires de recherche et les États-Unis s'en remettent en grande partie aux universités pour la recherche expérimentale. Cette stratégie apporte également des avantages au corps professoral et aux étudiants diplômés et, ce faisant, favorise l'enseignement et la formation.

Financement public contre financement par les entreprises

Assez étonnamment, seuls deux des huit pays qui ont répondu au questionnaire ne font pas état d'un financement public significatif de la recherche et du développement dans le domaine nucléaire. Pour autant, le Royaume-Uni et la Belgique n'ont pas renoncé à toute forme de financement public : le Royaume-Uni subventionne la recherche dans les universités par l'intermédiaire des *Research Councils* et, en Belgique, le financement public en faveur de la R-D passe par les Programmes-cadres de l'Union européenne.

La part du financement public est comprise entre 20 et 25 % en Suède, dépasse 80 % aux États-Unis et en Allemagne et frôle les 100 % en Italie. S'agissant des États-Unis, il convient cependant de noter que le rapport du financement public au financement privé est sensiblement inférieur dans la R-D nucléaire à ce qu'il est dans les autres secteurs de l'énergie. En outre, le programme de recherche de la Commission de la réglementation nucléaire est intégralement financé par le secteur privé par le biais de redevances d'utilisation. En conclusion, parmi les huit pays qui ont répondu au questionnaire, le message à retenir est que dans les trois quarts d'entre eux, la R-D dans le domaine de l'énergie nucléaire continue de bénéficier d'un financement public.

Financement de la R-D dans une perspective à long terme

L'axe des activités de R-D dans une perspective à long terme est le Forum international Génération IV, dont l'objet est la mise au point des futures générations de systèmes nucléaires. Les dix pays partenaires au sein du Forum Génération IV sont les suivants : Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Corée, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Suisse, et Euratom. Alors que plusieurs d'entre eux ne mènent pas de recherche concernant le développement à long terme, d'autres qui ne sont pas membres du Forum Génération IV y participent sous diverses formes. L'industrie et les organisations de recherche allemandes ont accès au programme GIF par l'intermédiaire d'Euratom (membre du Forum). En dehors du Forum Génération IV, les organisations de recherche allemandes

obtiennent des crédits pour le développement à long terme de la séparation et de la transmutation des déchets nucléaires. De même, la Belgique a accès, par l'intermédiaire de *Tractebel Engineering*, aux informations relatives au Forum Génération IV et participe aux activités de R-D relatives aux réacteurs à haute température.

L'Espagne est partie prenante du programme INPRO. Le principal objectif est de collaborer avec d'autres pays intéressés et l'AIEA au développement des réacteurs nucléaires et de cycles du combustible innovants susceptible de la prolifération et les risques pour l'environnement. Bien qu'elle s'intéresse aux futur concepts de réacteurs issus du Forum Génération IV, l'Italie met fortement l'accent sur les systèmes théoriques fission-fusion pour essayer d'atténuer les inquiétudes du public à l'égard des centrales nucléaires existantes.

Comparativement, les stratégies choisies par le Japon et les États-Unis concernant l'évolution à long terme de l'énergie nucléaire sont relativement volontaristes. Au Japon, on estime que la coopération internationale peut accélérer la mise au point de systèmes nucléaires innovants et que, compte tenu du ralentissement de la construction de nouvelles centrales, il importe de poursuivre les efforts de recherche et de développement dans ce cadre de façon à maintenir les compétences techniques. Pour le Japon et les États-Unis, l'avenir de l'énergie nucléaire s'inscrit dans une stratégie à long terme. Outre le Forum Génération IV, les États-Unis se sont engagés dans les programmes INERI et APCI. Le premier porte sur les systèmes d'énergie nucléaire avancés et le second, qui a une dimension internationale, concerne la mise au point de combustibles et l'étude de cycles du combustible liés aux futurs concepts de réacteurs. Il faut également citer le programme NP 2010 dont le but est d'aider l'industrie à surmonter les obstacles à la construction de nouvelles installations à court terme. Le secteur privé investit dans le projet NP 2010 mais pas dans Génération IV.

RAPPORTS NATIONAUX

Allemagne

Sensible aux préoccupations à l'échelle mondiale concernant l'enseignement et la formation nucléaires, le gouvernement allemand a décidé en 1999 de faire le point de la recherche sur la sûreté des réacteurs et les dépôts de déchets radioactifs en Allemagne. Une Commission d'évaluation a été créée pour établir les priorités, planifier le recrutement à moyen terme et la coopération entre les institutions et analyser la planification financière à moyen terme, de façon à maintenir les qualifications scientifiques concernant la sûreté des réacteurs nucléaires et le stockage définitif des déchets. Le rapport de la Commission d'évaluation met en lumière la baisse du financement public de la recherche nucléaire au cours des 15 dernières années et aborde le vieillissement du personnel scientifique et technique aujourd'hui en activité dans le domaine de la technologie nucléaire, la réticence de la nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs à s'engager dans ce secteur et le danger d'une perte irrémédiable de compétences scientifiques. Partant de ce constat, la Commission d'évaluation a formulé plusieurs recommandations, notamment :

- Une coopération dans ces domaines, portant à la fois sur le personnel et les contenus, doit être vigoureusement encouragée en Allemagne en vue d'améliorer l'efficacité.
- Des tâches prioritaires sont assignées à la recherche relative à la sûreté nucléaire et aux dépôts de déchets.
- Outre les activités de recherche menées dans les centres de recherche, l'accent est également mis sur la recherche dans d'autres installations en Allemagne. À cet égard, il conviendrait de financer dans la durée des activités de recherche sur la sûreté des réacteurs et le stockage définitif des déchets dans les universités, notamment pour maintenir les compétences scientifiques.
- Il faudrait veiller à ce que l'Allemagne continue de participer efficacement à des activités et projets internationaux de grande envergure en liaison avec le maintien et la poursuite des recherches sur la sûreté des réacteurs nucléaires et les dépôts. Cette recommandation vise la coopération avec les partenaires occidentaux aussi bien qu'avec les pays d'Europe centrale et orientale.
- Il faudrait que les pouvoirs publics cessent de réduire leur financement des projets et des institutions pour éviter une aggravation de l'hémorragie de main-d'œuvre ainsi qu'un déclin des compétences dans ce domaine. Les moyens financiers affectés à la recherche sur la sûreté des réacteurs nucléaires et sur les dépôts doivent être suffisants pour permettre au gouvernement fédéral d'honorer ses obligations légales.

La Commission d'évaluation a publié ses conclusions dans [2], qui fait un bilan complet des installations de recherche et dresse une liste de tâches prioritaires.

Initiatives prises par le gouvernement

À la suite des résultats du Comité d'évaluation, une Alliance des compétences en technologie nucléaire (*Kompetenzverbund Kerntechnik*) a été créée en mars 2000 dans le cadre du programme de recherche énergétique du HGF (*Hermann von Helmholtz Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren*). Cette alliance regroupe les centres de recherche de Jülich (FZJ), Karlsruhe (FZK) et Rossendorf (FZR), le GRS (*Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit*), et les universités proches de Aachen, Jülich, Karlsruhe, Stuttgart, Dresde, Zittau et Munich. L'objectif de cette alliance est explicité par la remarque de conclusion de la Commission d'évaluation :

« Indépendamment de la décision politique de sortir progressivement du nucléaire en Allemagne, maintenir la compétence du pays dans le domaine de la sûreté nucléaire est une nécessité pour les prochaines décennies. C'est un préalable incontournable si le gouvernement entend honorer ses obligations légales concernant les mesures de protection et les mesures destinées à garantir la sûreté des installations nucléaires et des options de stockage selon les méthodes scientifiques et technologiques internationales les plus récentes. »

Dans un premier temps, l'alliance a analysé la structure des effectifs et les besoins futurs en experts en technologie nucléaire des entreprises électriques, des industries de fabrication et de services, des autorités chargées de la réglementation et de l'octroi des autorisations, ainsi que les moyens éducatifs des universités, y compris le nombre d'étudiants inscrits dans les disciplines nucléaires. Les résultats ont été publiés par Fritz etc. (2001) dans [3]. Le rapport conclut que l'équilibre entre les moyens d'enseignement et de formation et les besoins de l'industrie s'est maintenu jusqu'en 2000. Cependant, si la tendance actuelle se poursuit pendant 10 à 20 années supplémentaires, une grave pénurie de compétences nucléaires est à craindre.

Initiatives des universités

Les universités qui sont membres de l'Alliance des compétences en technologie nucléaire sont en relation directe avec un centre de recherche implanté à proximité. Des chercheurs éminents appartenant à ces centres de recherche donnent des conférences dans les universités sur des sujets nucléaires et non nucléaires pour toucher un grand nombre d'étudiants. De leur côté, les étudiants ont la possibilité de mener à bien des stages, des mémoires de diplôme ou des thèses de doctorat dans des laboratoires ou des installations d'essai très intéressants proches de leur domicile. En outre, certaines universités proposent un programme très étoffé d'enseignement et technologie nucléaire.

Selon les données relatives à l'an 2000, extraites de [3], 29 universités, (y compris la *Fachhochschulen*) proposaient des cours magistraux dans le domaine nucléaire. Cependant, ce chiffre diminue d'environ deux unités chaque année. En 1999, de 300 à 470 étudiants environ suivaient des enseignements dans le domaine nucléaire. La même année, 66 mémoires de diplôme ont été rédigés et 59 thèses de doctorat décernées dans le domaine nucléaire. Toutefois, le diplôme spécial « d'ingénieur nucléaire » ne semble plus être recherché aujourd'hui. Les chiffres pour 2002 n'étaient pas disponibles, mais ils devraient être sensiblement inférieurs.

Initiatives de l'industrie

Une première initiative pour s'attaquer au problème du vieillissement des effectifs, qui touche presque toutes les entreprises travaillant dans la technologie nucléaire, a été prise par la jeune génération du KTG (*Kerntechnische Gesellschaft*) qui a organisé en 2002 à Erlangen un atelier intitulé

« La technologie nucléaire a un avenir ». Elle a invité des représentants de l'industrie nucléaire ainsi que des étudiants pour leur donner des informations, dans le cadre d'un libre échange de points de vue, sur le besoin de scientifiques et d'ingénieurs nucléaires dans les prochaines années.

En septembre 2002, *Deutsches Atomforum e.V.* a coordonné à Karlsruhe un colloque d'une durée de quatre jours sur le thème « Perspectives dans la technologie nucléaire », destiné à inciter les jeunes étudiants à choisir une discipline nucléaire et à les informer sur les débouchés offerts par la technologie nucléaire. Le ministère allemand de l'économie et de la main-d'œuvre (BMWA), des compagnies d'électricité et des fabricants, des universités et des centres de recherche ont fait des exposés. Le colloque prévoyait une visite à la centrale électrique de Phillipsburg et des réceptions en l'honneur des participants pour susciter des débats ouverts entre les étudiants et l'industrie. Certaines entreprises ont saisi l'occasion pour proposer des emplois et des stages directement lors du colloque. Le succès de cette initiative a été tel que *Deutsches Atomforum e.V.* a décidé de réitérer l'expérience en 2003. Wasgindt [4] donne de plus amples informations sur cette manifestation.

VGB PowerTech e.V. a annoncé la tenue en 2003 d'un cours d'été gratuit intitulée « Introduction à la technologie électronucléaire » dans le but d'attirer l'attention des étudiants et de les inciter à se lancer dans une carrière nucléaire.

Le centre d'enseignement nucléaire de TÜV NORD GRUPPE a été créé en 2002 pour améliorer les moyens d'enseignement et de formation de l'entreprise en interne. Confrontés à la nécessité de remplacer dans les vingt années à venir 150 spécialistes dans les services chargés de contrôler la sûreté d'exploitation des centrales nucléaires, l'entreprise TÜV NORD GRUPPE, la Société pour la sécurité des réacteurs (GRS) et les autorités nucléaires ont mobilisé plus de 30 professeurs issus de leurs rangs pour commencer à former 40 étudiants en dispensant plus de 150 conférences sur la technologie, la radioprotection, la législation et d'autres thèmes touchant à l'exploitation des centrales nucléaires. Helmers *et coll.* [5] donnent de plus amples détails sur cette initiative.

Le recrutement de jeunes diplômés pour Framatome ANP/GmbH fait l'objet d'une action coordonnée du département des ressources humaines et des unités opérationnelles. L'analyse et l'exploitation des contacts existants avec les universités et les *Fachhochschulen* assure une adéquation de la recherche de candidats aux besoins. Ces activités sont étayées par une intense participation à des forums de recrutement et des salons de l'emploi dans les universités. En outre, ces contacts sont renforcés par le financement au sein de l'entreprise de thèses de doctorat abordant presque toutes les disciplines techniques.

Initiatives des instituts de recherche

Les centres de recherches de Karlsruhe FZK et Jülich FZJ ont récemment donné le coup d'envoi de quelques projets de recherche novateurs qui donnent un lustre nouveau à la recherche nucléaire. On peut citer :

- Un projet, prévoyant des expériences en laboratoires chauds, sur la séparation appliquée à la gestion des déchets nucléaires.
- La mise au point d'une usine de vitrification prototype pour les déchets liquides de haute activité, dont la mise en service est actuellement en cours.
- Des études analytiques et expérimentales sur la chimie des actinides pour la gestion des déchets nucléaires.

- Un projet sur la technologie Pb-Bi dans les systèmes pilotés par accélérateur, prévoyant l'exploitation d'un laboratoire international pour les utilisateurs.
- Un projet sur les phénomènes liés à l'hydrogène et les mesures d'atténuation en liaison avec la sûreté des réacteurs nucléaires, etc.

En général, on relève un fort pourcentage de jeunes scientifiques dans ces projets qui s'intègrent dans des programmes internationaux de la Commission européenne.

Le Centre de recherche de Rossendorf (FZR) fait état de projets de recherche ambitieux, par exemple sur les transitoires avec dilution de bore, l'élaboration de codes d'écoulement biphasés pour les applications à la sûreté nucléaire, les aspects relatifs à la sûreté des réacteurs à sel fondu, ou l'application du concept de courbe maîtresse au matériau irradié de la cuve sous pression du réacteur. L'institut radiochimique du FZR a lancé un projet sur la chimie des actinides dans le cadre d'un stockage définitif éventuel des déchets nucléaires dans des couches profondes.

Parallèlement à ces projets de recherche nouveaux et dynamiques, le FZR et d'autres centres de recherche s'attachent à intensifier les échanges de scientifiques avec les pays de la CEE, à participer au programme du STC (Centre technique du SHAPE) entre la Russie et l'Allemagne dans le domaine de la technologie nucléaire, à renforcer la collaboration avec l'UE, et à offrir des emplois permanents à de jeunes chercheurs talentueux en dépit de la diminution générale du nombre des postes de cette nature.

Les centres de recherche sont conscients de la lourde responsabilité qui leur incombe en matière d'enseignement et de formation avancée de jeunes scientifiques et ingénieurs. D'où un nombre considérable de thèses de doctorat et de formations post-doctorales en coopération étroite avec les universités comme cela a été décrit plus haut.

Ressources de R-D actuelles

On trouvera dans [2] une analyse méthodique et détaillée de l'ensemble des ressources de R-D nucléaires dans les organismes publics en Allemagne. Pour la période 1996 à 1998, les chiffres ont été, en moyenne, les suivants :

- 59,5 personnes-années pour la conception de centrales innovantes ;
- 80,1 personnes-années pour la recherche sur les matériaux ;
- 266,6 personnes-années pour la gestion des déchets nucléaires, démantèlement compris ;
- 245,8 personnes-années pour la recherche concernant la sûreté des réacteurs nucléaires en exploitation.

Depuis lors, les ressources consacrées aux concepts de centrales innovants ont été ramenées à zéro, à la suite de la décision du gouvernement allemand de se désengager progressivement de l'énergie nucléaire. Les ressources affectées à la recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire et à la recherche de nouveaux matériaux ont été réduites d'environ 20 % dans les centres de recherche, tandis que les ressources pour la gestion des déchets nucléaires sont apparemment demeurées à peu près constantes.

Le document [3] donne un bon aperçu des ressources de R-D de l'industrie nucléaire : pendant l'année 2000, les compagnies d'électricité allemandes ont employé 400 personnes ayant fait une carrière universitaire dans le domaine nucléaire (ce qui ne veut pas dire pour autant qu'elles sont toutes affectées à des projets de R-D). Les fabricants et les entreprises de services nucléaires font état d'environ 1 400 employés ayant des antécédents professionnels en milieu universitaire dont, selon le questionnaire, 230 seraient engagés dans des activités de R-D.

Un certain nombre d'installations de R-D demeurent disponibles en Allemagne, en premier lieu pour la recherche sur les matériaux, la gestion des déchets et la recherche (hors réacteur) sur la sûreté nucléaire. Toutefois, des réacteurs de recherche et une usine de retraitement prototype ont été mis hors service et aucun centre n'est plus en mesure de proposer de recherche et de formation dans des installations nucléaires prototypes. En revanche, les centres de recherche et l'industrie ont accumulé une expérience non négligeable dans le démantèlement des installations nucléaires au cours des dernières années.

La part des collaborations multilatérales est déjà relativement élevée dans les centres de recherche : au FZK et au FZJ environ deux sur trois du total des projets de recherche financés par une tierce partie sont des collaborations multilatérales, dont la plupart sont financées par la Commission européenne. On attribue cette situation aux recommandations de la Commission d'évaluation [2] en 2000, qui indiquait en substance qu'il fallait faire en sorte que l'Allemagne continue de participer activement à des activités internationales de grande portée.

Tendances de la R-D financée par l'industrie

La R-D relative aux futurs réacteurs européens à eau pressurisée (EPR) a été financée par Siemens AG jusqu'en 1998. Le contrat avec les instituts de recherche a ensuite été annulé sur décision du gouvernement. Depuis lors, seules quelques activités sont financées dans les instituts de recherche par les entreprises, essentiellement dans une perspective à court terme et en liaison avec la sûreté des centrales nucléaires existantes, par exemple :

- soutien pour les problèmes concrets des réacteurs en exploitation ;
- projets relatifs à la sûreté des réacteurs en exploitation ;
- analyses radiochimiques spéciales ;
- calculs du transport des radionucléides.

La R-D concernant les systèmes de réacteurs attendus à brève échéance est essentiellement le fait de l'industrie elle-même.

Selon les données figurant dans [2], 1999, le secteur privé a participé au financement de projets de recherche visant la sûreté des réacteurs nucléaires, des dépôts et la mise au point de futurs réacteurs, pour un montant total de 10,8 millions d'EUR.

En 2002, plus de 100 personnes travaillant dans des centres et des instituts de recherche étaient financées par des tierces parties. Sont pris en compte dans ces chiffres les projets financés par la Commission européenne et les autres organismes publics. On estime qu'environ un tiers de ces personnes sont financées par l'industrie mondiale.

Tendance de la R-D bénéficiant d'un financement public

Les activités de recherche sur la sûreté nucléaire et sur les dépôts financées par la BMWA visent exclusivement à résoudre des questions génériques ayant trait à la sûreté des réacteurs en exploitation et aux stratégies de gestion des déchets, en particulier les dépôts finals. L'objectif général et permanent de la recherche sur la sûreté des réacteurs est de contribuer au perfectionnement des technologies liées à la sûreté et de continuer à améliorer les connaissances et les procédures concernant l'évaluation réaliste de la sûreté des installations nucléaires.

Le financement public de la recherche portant sur la sûreté des réacteurs nucléaires et des dépôts a baissé régulièrement dans le passé. Même certaines installations expérimentales de réputation mondiale ont dû être démantelées et déconstruites faute de financement. Parallèlement, la part de la coopération internationale a pris une nouvelle ampleur. Aujourd'hui, la plupart des projets s'inscrivent dans des programmes internationaux tels que les programmes-cadres de la CE. L'Allemagne est membre de l'AIEA et de l'OCDE/AEN. Les experts allemands nommés par le gouvernement fédéral sont très présents dans les comités, commissions et groupes de travail de ces organisations et l'Allemagne participe à l'ensemble des projets de l'OCDE/AEN car ils sont techniquement intéressants, financièrement rationnels et renforcent la coopération internationale.

Le financement public est le principal moyen de maintenir les compétences et les capacités de R-D dans les universités et les centres de recherche. Les universités et les centres de recherche sont tributaires du financement public à hauteur d'environ 90 % et 70 à 80 %, respectivement. Dans les centres de recherche une part importante de ces fonds est investie dans les infrastructures nécessaires à la construction de nouvelles installations d'essai ou au maintien des installations existantes. En général, moins de la moitié du financement institutionnel est affecté aux dépenses de personnel. Il n'en va pas de même dans les universités où, généralement, aucun financement public n'est disponible pour l'investissement dans les infrastructures et où les dépenses de personnel absorbent la totalité des crédits.

En revanche, dans le secteur privé, le nombre des activités de R-D bénéficiant d'un financement public est extrêmement faible.

Dans la logique de sa décision de renoncer progressivement à la filière nucléaire, le gouvernement allemand ne finance pas de programmes de développement à long terme tels que Génération IV ou INPRO.

Enseignements tirés de la collaboration internationale

La collaboration internationale dans la recherche sur la sûreté nucléaire revêt plusieurs avantages : la comparaison et la concurrence feront avancer la science, les échanges entre experts élargissent la base de connaissances et peuvent conduire à une convergence de vues sur la définition des problèmes posés, les programmes de travail et l'interprétation des résultats ; des projets et des installations expérimentales financièrement hors de portée d'un seul pays peuvent être réalisés. En outre, elle peut permettre d'éviter les doubles emplois

Aujourd'hui, les projets internationaux sont généralement bien acceptés par l'industrie et les centres de recherche en Allemagne, bien que les formalités administratives indissociables du financement par la CE soient parfois jugées pesantes et que les frais de déplacement dépassent généralement ceux associés aux projets nationaux.

Conclusions

L'Allemagne a pris la mesure du problème posé par le vieillissement du personnel dans l'industrie et la recherche nucléaires. Plusieurs actions de sensibilisation ont été lancées et un premier train de mesures destinées à attirer de jeunes étudiants a été engagé pour remédier à ce problème. Toutefois, ces efforts n'ont pas encore suscité beaucoup d'écho auprès des étudiants dans les universités allemandes, ce qui pourrait tenir à l'image négative de l'énergie nucléaire véhiculée par les médias en Allemagne, encore que la situation ait commencé à s'améliorer.

La politique visant à mettre en commun les installations nucléaires, à échanger le savoir-faire et à s'épauler mutuellement au moyen de technologies spécifiques, dans le cadre de collaborations internationales, aura certainement pour effet de renforcer les capacités nationales d'enseignement et de recherche dans le domaine nucléaire. En outre, la collaboration internationale semble même avoir incité de jeunes chercheurs à travailler dans le domaine nucléaire, ce qu'atteste déjà l'augmentation significative de jeunes ressortissants étrangers dans la technologie nucléaire. Même en l'absence de mesures d'incitation supplémentaires, la plupart des projets de R-D actuellement réalisés dans les centres de recherche allemands s'inscrivent déjà dans des programmes internationaux. Par ailleurs, les conseils de recherche allemands ont vivement recommandé une collaboration avec les programmes Génération IV et INPRO malgré l'absence actuelle de financements publics en faveur de ces programmes.

Belgique

- Population (2001) : 10,3 millions
- Superficie : 30 825 km²
- Consommation d'énergie primaire (2001) : 64 millions de tonnes d'équivalent pétrole
- Consommation d'énergie nucléaire (2001) : 10,7 millions de tonnes d'équivalent pétrole

À la fin 1999, la puissance électrique nette installée était égale à 15 569 MW, se décomposant comme suit : parc nucléaire, 5 713 MW, centrales à combustibles fossiles, 8 327 MW, aménagements hydrauliques ou stations de pompage, 1 404 MW, le petit pourcentage restant correspondant au système de valorisation des déchets et aux aérogénérateurs. La production nette s'est élevée à 80,85 TWh dont 57,8 % d'origine nucléaire.

En partie, à cause du passé industriel de ce pays, les activités nucléaires ont débuté très tôt en Belgique. Le premier réacteur de recherche a divergé en 1956. Sept REP, totalisant 5,8 GWe, ont été successivement connectés au réseau entre 1974 et 1985. Malgré les excellentes performances d'exploitation des réacteurs, le gouvernement a approuvé le 1^{er} mars 2002 le projet de loi prévoyant l'arrêt définitif des réacteurs nucléaires à l'issue de 40 années de service, c'est-à-dire entre 2015 et 2025. Une année auparavant, un groupe international d'examen par les pairs avait entériné une importante recommandation de la commission dite AMPERE : « Pour maintenir l'option nucléaire ouverte, il convient de garantir le maintien d'un potentiel scientifique et technologique permettant aux producteurs d'électricité d'assurer que cette production se fasse de la manière la plus efficace et dans des conditions de sûreté optimales et de conserver le savoir-faire national, public et privé, dans le secteur de l'électronucléaire, ainsi que de participer à la recherche et au développement, essentiellement privés, des filières du futur ». À l'échelon de l'État, les règles juridiques et réglementaires avaient été fixées dans des lois votées en 1955 et en 1963. En 2001, l'Agence fédérale de contrôle nucléaire est devenue opérationnelle et une directive européenne sur les qualifications des experts en radioprotection a été transposée dans la loi belge. La fabrication du combustible à l'uranium et au plutonium a démarré à la fin des années 1950. En 2001, 31 tonnes de combustible MOX ont été produites. Début 2000, des déchets de haute activité vitrifiés sont revenus de la Hague. Ils sont entreposés au site de Belgoprocess, une entreprise sœur de ONDRAS-NIRAS, l'entreprise chargée depuis 1980 de la gestion des déchets nucléaires en Belgique.

Enseignement nucléaire

Pendant longtemps, la forte demande d'ingénieurs nucléaires, conjuguée à l'attrait du secteur, a permis à toutes les universités et à tous les instituts techniques supérieurs d'avoir un nombre suffisant

d'étudiants inscrits à leurs programmes nucléaires. Lorsque le secteur nucléaire a cessé de croître et que son image dans la société a commencé à se dégrader, le nombre des étudiants a progressivement décliné. Actuellement, le fait que les autorisations d'exploitation des installations nucléaires exigent des diplômés de l'enseignement nucléaire supérieur, garantit un nombre minimal d'étudiants.

Récemment, certaines grandes universités, en liaison avec le Centre d'étude de l'énergie nucléaire belge (SCK•CEN) et avec le soutien de l'industrie nucléaire nationale, ont fusionné leurs programmes nucléaires en un seul programme, très modulaire, et enseigné en anglais. Le *Belgian Nuclear higher Education Network* distribue cinq bourses (10 000 EUR chacune) pour suivre le programme d'études de troisième cycle. Certaines universités organisent un cursus de quatre années débouchant sur un Master à finalité nucléaire.

Trois autres instituts belges organisent des programmes d'une durée de quatre ans conduisant à un Master en technologie nucléaire, technique nucléaire médicale et radiochimie.

Des contacts avec des collègues européens ont abouti à la création du Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires (*European Nuclear Engineering Network – ENEN*). L'ENEN a été lancé en tant que projet européen au titre du cinquième – programme-cadre de R-D le 1^{er} janvier 2002. Le projet, dont le SCK•CEN assure la coordination, contribue à la création d'un secteur d'enseignement à l'échelle européenne dans le domaine du génie nucléaire. Le système repose sur un processus d'accréditation mutuellement approuvé permettant la reconnaissance réciproque des activités d'enseignement à travers l'Europe ; il s'agit en particulier d'inciter les étudiants à la mobilité et d'assurer l'équivalence des programmes universitaires fondés sur le Système européen de transfert et d'accumulation de crédits (ECTS) décrit dans la « Déclaration de Bologne sur l'espace européen de l'enseignement supérieur » de juin 1999.

Des cours pilotes sont organisés pour démontrer la faisabilité du concept. Les cours sur les phénomènes thermo hydrauliques nucléaires et la théorie des réacteurs nucléaires, dispensés dans le cadre du Programme d'études supérieures universitaires belge en génie nucléaire sont structurés de façon très modulaire et enseignés en anglais pour faciliter et renforcer la participation d'étudiants européens. Les cours exploitent pleinement les installations et infrastructures de laboratoire du Centre de recherche nucléaire belge.

En outre, les parties à l'ENEN se sont constituées en une association à but non lucratif dont l'objectif principal est la préservation et le développement plus approfondi d'un savoir-faire et d'un niveau de formation élevé. L'association se compose de membres effectifs et de membres associés. Les membres effectifs sont des institutions académiques qui dispensent un niveau élevé d'enseignement scientifique dans le domaine de l'énergie nucléaire. Les membres associés bénéficient d'une tradition fortement ancrée de relations avec certains membres dans les domaines de l'enseignement, la formation et la recherche. Les nouveaux membres sont élus par l'assemblée générale sur recommandation du Conseil d'administration. La première assemblée générale s'est tenue le 11 novembre 2003.

Dans le cadre du sixième programme-cadre de R-D européen, le projet NEPTUNO élargit la portée de l'ENEN à la formation professionnelle dans le domaine du nucléaire. On espère ainsi aboutir à la création d'un réseau opérationnel pour des programmes de formation et d'apprentissage continu, ayant pour objectifs : le maintien de l'excellence européenne en technologie nucléaire : des approches harmonisées concernant la formation et l'enseignement en génie nucléaire ; des approches harmonisées concernant la sûreté et les pratiques exemplaires, qu'il s'agisse des aspects opérationnels ou réglementaires ; préservation des compétences et du savoir-faire pour garantir une utilisation sûre de l'énergie nucléaire et d'autres utilisations des rayonnements dans l'industrie et la médecine.

Également dans le cadre du cinquième programme-cadre de R-D européen, un consortium des principales entreprises de démantèlement a créé la *European Nuclear Decommissioning Training Facility*. L'objectif de l'EUNDETRAF est de diffuser à l'échelle européenne les connaissances sur le démantèlement au moyen de cours de formation. Un cours comprend une semaine d'étude théorique et une semaine d'exercices pratiques. Trente personnes ont participé au volet théorique du premier cours, du 18 au 29 novembre 2002. Neuf participants avaient participé à une formation pratique. Des contacts préliminaires sont pris pour organiser des cours de formation analogues en Russie.

En 2002, le personnel du SCK•CEN a organisé pour la dixième fois le cours de formation intitulé : « Off-site Emergency Planning and Response to Nuclear Accident ». Le cours est subventionné par la Commission européenne et est déjà prévu pour 2004, 2006 et 2008.

Fort de plus de 40 années d'expérience dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires, de la protection radiologique et de la radiobiologie, le SCK•CEN a créé il y a quelques années l'*International school for Radiological Protection (isRP)*, www.sckcen.be/isrp/. Les cours sont essentiellement, mais pas exclusivement, destinés au personnel du Centre. L'isRP s'adresse en premier lieu aux services de sécurité et de secours, dans le cadre des missions des affaires intérieures, de la santé publique et de l'environnement, du travail et de l'emploi. Dans le secteur privé, les cours s'adressent surtout au personnel des centrales nucléaires belges, des entreprises externes de services nucléaires, et au personnel médical qui se sert de radiations ionisantes à titre professionnel et doit être habilité par les autorités. Par sa contribution à la formation des inspecteurs d'Euratom, des experts ALARA et des responsables pour le transport international de matériaux radioactifs, l'isRP a créé peu à peu une relation de confiance avec des organisations comme la Commission européenne, l'AIEA et diverses organisations internationales travaillant dans l'une ou l'autre discipline associée à la radioprotection.

La *Hogeschool Limburg* et le SCK•CEN organisent le cours qui conduit à la qualification d'expert en radioprotection, selon la définition donnée dans la Directive 96/29/Euratom de l'UE. C'est un programme de 120 heures portant sur la physique nucléaire, la physique des rayonnements, la radiochimie, la dosimétrie appliquée, la radiobiologie, les principes de protection contre les rayonnements et la radioprotection appliquée, prenant en compte la réglementation et la législation européennes et belges. Le cours est enseigné en néerlandais. L'Institut supérieur industriel de Bruxelles organise le cours en français en liaison avec l'Institut national des radioéléments.

Le personnel du SCK•CEN participe à l'organisation du *European Radiation Protection Course (ERPC)*. L'ERPC dispense les connaissances nécessaires pour être reconnu « expert qualifié en radioprotection ». L'ERPC est enseigné à l'Institut national des sciences techniques et nucléaires (France).

Dans l'intention délibérée d'augmenter son réservoir de jeunes chercheurs hautement spécialisés et de resserrer ses liens avec les universités, le SCK•CEN recrute chaque année des aspirants au doctorat ou des chercheurs post-doctorants. En 2002, le SCK•CEN a retenu six chercheurs pour préparer une thèse de doctorat ou réaliser un projet de recherche post-doctoral.

Soucieux d'encourager la recherche de haute qualité, le SCK•CEN octroie tous les deux ans le prix professeur Roger van Geen, d'un montant de 12 500 EUR, au meilleur travail original dans la recherche nucléaire belge. Le SCK•CEN attribue chaque année des prix de respectivement 1 500 EUR et 1 000 EUR pour les meilleures thèses universitaires et non universitaires, réalisées dans ses laboratoires.

La gestion des connaissances étant cruciale pour l'ensemble des activités nucléaires et les connaissances étant un bien naturel primordial, le SCK•CEN a adopté une nouvelle stratégie. À titre de projet pilote, une communauté interactive utilisant un portail Internet été mise en œuvre pour assurer de meilleures conditions d'extraction et d'accès concernant les données et les documents existants, expliciter les connaissances tacites et renforcer la communication interne. Les services et les systèmes de la bibliothèque sont également replacés dans le concept plus vaste de gestion des connaissances.

Corée, République de

Contexte

En mars 1962, un réacteur de recherche TRIGA Mark II a divergé pour la première fois en Corée. C'était une initiative audacieuse pour ce pays qui avait accédé à l'indépendance en 1945 et traversé ensuite un long conflit.

Dix ans après cette première divergence, commençaient les travaux de construction de la première centrale commerciale coréenne, la tranche 1 de la centrale de Kori, d'une puissance installée de 600 MWe, dont la mise en marche en 1978 a marqué l'avènement de la seconde ère de l'histoire électro-nucléaire de la Corée.

Depuis lors, l'activité de la Corée dans ce domaine s'est intensifiée et régulièrement élargie. En dépit de la crise financière de 1997, qui a provoqué une série de changements profonds dans les pratiques sociales en Corée, notamment l'introduction de méthodes de gestion tels que les privatisations, les réductions de personnel, les restructurations, la sous-traitance, etc., la croissance vigoureuse des activités liées à l'énergie atomique ne s'est pas démentie. L'essor rapide et soutenu des activités dans ce domaine donne à la communauté internationale un bon exemple d'utilisation pacifique de l'énergie atomique.

Il y a actuellement 18 centrales commerciales en exploitation qui produisent environ 41,7 % de l'électricité du pays. Quatre de ces centrales sont du type CANDU, les 14 autres sont du type REP. Quatre tranches (tranches 5 et 6 de la centrale d'Ulchin et tranches 1 et 2 de la centrale de Shin-Kori) sont en construction et six devraient être construites d'ici à 2015 selon les prévisions de la demande et de l'offre d'électricité de base établie par le MOCIE (ministère du Commerce, de l'Industrie et de l'Énergie). Par ailleurs, la Corée a enregistré des taux de disponibilité élevés pour ses réacteurs, soit 93,2 % en 2001 et 92,7 % en 2002.

En Corée, les principales organisations liées à l'énergie nucléaire appartiennent au secteur public. Les entreprises nucléaires telles que la KHNP (Société hydroélectrique et électronucléaire de Corée), la KNFC (Société du combustible nucléaire de la KEPCO), la KOPEC (Société de génie électrique de Corée), la KPS (Société de services aux centrales coréennes), le KEPRI (Institut de recherche sur l'énergie électrique de la KEPCO) sont placées sous la tutelle du MOCIE, tandis que l'Institut de recherche et le groupe des experts réglementaires, le KAERI (Institut coréen de recherche avancée sur l'énergie) et le KINS (Institut coréen pour la sûreté nucléaire), dépendent du MOST (ministère de la Science et de la Technologie).

Six universités offrent des programmes en génie nucléaire et bon nombre d'établissements d'enseignement supérieur proposent des programmes d'application médicale des rayonnements. Environ 210 diplômés d'ingénieur nucléaire sont décernés chaque année. Ces dernières années, le nombre d'étudiants qui se spécialisent en sciences et en technologie a tendance à baisser et des mesures correctrices sont mises en place pour remédier à la situation.

L'essor rapide de l'industrie nucléaire dans les premières étapes du développement de cette industrie explique la forte demande d'ingénieurs nucléaires dans les années 1980. Cependant, depuis lors, en dépit de l'augmentation régulière des utilisations de l'énergie atomique, tant en ce qui concerne la production d'électricité que les rayonnements, on observe un ralentissement spectaculaire du recrutement. La crise financière survenue à la fin de 1997 a accéléré le plan gouvernemental de privatisation du marché de l'électricité, d'où une baisse supplémentaire des nouvelles embauches.

Gouvernement

Le nucléaire relevant du secteur public, il est très sensible et très soumis aux politiques gouvernementales. Tous les cinq ans, le MOST établit le Plan global de promotion de l'énergie nucléaire (CNEPP), en application de la Loi sur l'énergie atomique. Le CNEPP énonce des objectifs d'action et de grandes orientations à long terme en matière d'énergie nucléaire, des objectifs sectoriels, un budget et un plan d'investissement, etc., sans oublier les questions relatives à la main-d'œuvre. La Loi sur l'énergie atomique stipule que le MOST et les responsables des ministères concernés établissent des plans de mise en œuvre sectoriels pour les activités dont ils ont la charge au titre du CNEPP et élaborent et exécutent des plans d'action annuels.

Chaque année, le MOST procède à un état des lieux dans le domaine nucléaire, qui comporte des données sur la situation de la main-d'œuvre et de l'enseignement/formation dans les disciplines nucléaires. Cependant, il s'agit plutôt d'obtenir une vision globale du secteur nucléaire en Corée que d'évaluer précisément les moyens d'enseignement et de formation ou d'essayer d'attirer la prochaine génération d'étudiants vers le secteur nucléaire.

Conscient de la vulnérabilité potentielle du système de l'offre et de la demande, le MOST a financé une étude d'orientation concernant la demande et l'offre de main-d'œuvre nucléaire, qui a clairement alerté le gouvernement sur la pénurie d'experts nucléaires dans les pays avancés et la situation de la main-d'œuvre dans les industries, les instituts de recherche et les organismes d'enseignement liés au nucléaire en Corée.

Aiguillonné par l'étude d'orientation, le MOST a décidé d'étoffer le questionnaire de son enquête annuelle de façon à obtenir des informations plus détaillées sur la main-d'œuvre. Il a également élargi aux étudiants des premier et deuxième cycles qui se spécialisent en génie nucléaire son programme de recherche de perfectionnement et de formation à l'étranger de la main-d'œuvre nucléaire. Cinquante deux étudiants des premier et deuxième cycles en 2002, et 76 en 2003, appartenant aux six universités offrant des programmes nucléaires, ont reçu des subventions de recherche d'un montant d'environ 5 000 dollars des États-Unis. Par ailleurs, le MOST finance également la société des étudiants des premier et deuxième cycles en technologie nucléaire (*Nuclear Technology Undergraduate student society – NtUss*), créée par les étudiants bénéficiaires de subventions. Le NtUss a organisé un programme de visites d'un institut de recherche ou d'une installation nucléaire, un stage de recherche, des cours magistraux et une conférence sur la recherche destinée aux étudiants appelée *NtUss Forum* et il s'affirme comme un modèle de bonnes pratiques dans le domaine de la science et de la technologie. Quelques étudiants de premier et deuxième cycles ont reçu des bourses de formation à l'étranger en 2002 et 2003.

Le MOST a mis en place un programme de développement des infrastructures pour étendre aux universités le financement de la recherche. Le ministère de l'Éducation a créé un programme intitulé BK21 (*Brain Korea 21st century*) pour soutenir la recherche et l'enseignement dans les universités. Récemment, le MOCIE a lancé également un programme de perfectionnement de la main-d'œuvre en faveur des industries et des universités en rapport avec les entreprises électriques. Auparavant, le

financement des universités se limitait à la science fondamentale et appliquée et aux recherches technologiques. Cependant, l'élargissement récent du programme d'aide aux universités s'étend à un large éventail de recherches qui englobe les finalités éducatives.

Situation de la main-d'œuvre

En 2001, environ 11 000 ingénieurs travaillaient dans le secteur nucléaire en Corée. La cohorte la plus fournie dans la pyramide des âges correspond à la tranche des 35 à 40 ans et la seconde à celle des 41 à 44 ans. Le vieillissement ne semble donc pas très préoccupant en général, mais la répartition reflète les licenciements massifs de travailleurs âgés consécutifs à la crise financière intervenue à la fin de 1997. Dans l'ensemble, les problèmes de vieillissement sont plus aigus dans les instituts de recherche que dans l'industrie.

La répartition des diplômes est la suivante : licences 44,8 %, maîtrises 13,1 %, doctorats 6,9 %, les autres diplômes étant inférieurs à la licence. 92 % des titulaires de diplômes inférieurs à la licence se trouvent soit au KHNP, soit au KPS, et 82,1 % des titulaires d'un doctorat sont employés par le KAERI ou le KINS.

S'agissant des titulaires de licences en sciences, la répartition est la suivante : ingénieurs mécaniciens 25 %, ingénieurs électriciens 24 %, ingénieurs nucléaires 13 % (pour un total de 6 967). Étant donné qu'une partie des travailleurs les plus âgés chevronnés ont déjà été licenciés en 1997 au moment de la crise financière, seule une petite fraction des ingénieurs prendra sa retraite au cours des 10 à 15 prochaines années. Peu de nouveaux experts ont été embauchés au cours des cinq à dix dernières années, et les nouveaux recrutements devraient demeurer limités, compte tenu de la privatisation du marché de l'électricité en cours. Cependant, l'augmentation du nombre de centrales en exploitation et l'essor des activités de R-D à l'échelon national laissent espérer la création de nouveaux postes. En 2002, le gouvernement a autorisé exceptionnellement la compagnie d'électricité à procéder à 400 nouveaux recrutements.

Au cours des cinq années à venir, les ingénieurs nucléaires représenteront 18,2 % des départs la retraite dans le secteur, et leur pourcentage des effectifs total tombera à environ 12 %. Cette tendance à la baisse du nombre des ingénieurs dans l'industrie fait craindre un relâchement des liens au sein de la communauté nucléaire, un affaiblissement des capacités, un manque de vision prospective, etc.

Universités

Les universités subissent la baisse tendancielle à l'échelon national des inscriptions dans les disciplines scientifiques et technologiques. Le génie nucléaire n'échappe pas à ce phénomène. Dix années de faible espoir de recrutement et la mauvaise image du secteur dans le public ont entraîné une baisse des inscriptions. Compte tenu de la faiblesse des inscriptions, la recherche tend à prendre le pas sur l'enseignement dans les priorités de l'université. Cependant, les inscriptions aux cours de maîtrise sont encore plus rares.

Le K-NEDHO (Organisation des chefs de département de génie nucléaire en Corée) a été constitué et a tenu plusieurs réunions en 2001 pour examiner la question de la baisse des inscriptions. Le K-NEDHO a rendu compte au gouvernement de la baisse de fréquentation des programmes universitaires de façon à attirer son attention et à obtenir son soutien, ce qui s'est traduit par l'extension du programme de perfectionnement de la main-d'œuvre aux étudiants des premier et deuxième cycles (NtUss).

Quinze étudiants des premier et deuxième cycles de six universités ont été invités à visiter le réacteur de recherche de l'université de Kyoto et ont pu suivre une formation d'une durée de deux semaines à l'étranger en 2003 grâce à la subvention du MOST. La KNEF (Fondation coréenne pour l'énergie nucléaire) gère un programme de visites des installations nucléaires destiné aux étudiants des premier et deuxième cycles ; une centaine ont visité les centrales en exploitation et en construction en 2002.

Le KAERI propose des stages aux étudiants diplômés dans le cadre d'un programme déjà ancien. Les étudiants participent à des projets de R-D du KAERI et reçoivent des diplômes de leurs universités. Une partie de l'enseignement prend la forme de séminaires intensifs d'une durée d'un mois. Il s'agit de former une nouvelle génération de chercheurs bien préparés et d'intensifier les recherches en coordination entre les instituts de recherche et les universités. Le stage débouche souvent sur un emploi.

Le nombre et la qualité des subventions pour la recherche universitaire évoluent favorablement. Le financement public (Fonds pour la R-D nucléaire), qui correspond à un US mille par kWh d'électricité nucléaire produite, augmente en raison de l'accroissement du parc nucléaire en exploitation. En outre, pendant le processus de privatisation du marché de l'électricité, le gouvernement a dégagé de nouveaux crédits pour l'exécution des missions de service public qui incombaient précédemment à l'entreprise électrique nationale.

Il y a une cinquantaine de professeurs dans l'enseignement des disciplines nucléaires. Leur âge moyen dépasse 50 ans et le plus jeune d'entre eux a 37 ans. Un tiers des professeurs devraient prendre leur retraite dans les dix ans à venir, aussi sont-ils davantage préoccupés par les subventions de recherche que par le long terme.

Industries

Au total, 41,7 % de l'électricité produite en Corée est d'origine nucléaire et le parc nucléaire continue de croître. La production d'électricité nucléaire est une source de revenus de première grandeur dans le pays. La privatisation du marché électrique coréen est en marche depuis 1999. Les nouveaux recrutements ont été artificiellement interrompus par les autorités de tutelle, en raison des incertitudes quant à la structure future du marché de l'électricité. Cependant, compte tenu de l'augmentation du nombre de centrales en exploitation, le service de la planification et du budget (gouvernement coréen) a autorisé, à titre exceptionnel, le KHNP à procéder à 400 nouveaux recrutements en 2002, pour pouvoir respecter les prescriptions d'autorisation fixées par le MOST concernant la tranche 5 de la centrale de Yonggwang. Le KHNP a élargi son propre programme de perfectionnement du personnel en créant un programme de formation et d'enseignement à moyen et à long terme à l'intention de son personnel dirigeant. Le programme couvre divers aspects du nucléaire, y compris des cours de gestion et d'animation, et se compose d'un programme de formation interne/externe dispensée par des instituts de formation coréens et étrangers.

De concert avec le MOCIE, le KHNP a créé et parrainé la KNEF qui a pour mission de promouvoir une vision rationnelle de l'énergie nucléaire et de contribuer à l'information du public en diffusant des connaissances objectives et scientifiques au sujet de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire. Elle est notamment chargée de réaliser des campagnes de promotion et de publicité dans les médias, de familiariser les générations futures avec l'énergie nucléaire, de proposer des activités éducatives et de lancer des projets de promotion culturelle dans les régions à proximité des centrales nucléaires.

En Corée, la R-D nucléaire financée par l'industrie a été organisée par le MOCIE et le KHNP. Les objectifs des programmes de R-D ont évolué en fonction de la capacité technique du secteur nucléaire coréen. La Corée a commencé par acquérir les technologies, puis elle est passée au stade du transfert de technologies avant de parvenir à l'autosuffisance en matière de technologie nucléaire. Actuellement, la R-D industrielle privilégie la mise au point de technologies originales et la conquête de l'autonomie dans la construction et l'exploitation des centrales nucléaires.

L'industrie a financé aussi bien des projets à court terme concernant l'exploitation et la maintenance des centrales que des projets à long terme tels que le projet KSNP (Korea Standard Nuclear Plant) et le projet AP1400 (REP de conception avancée de 1 400 MWe). Cependant, par rapport à la R-D bénéficiant d'un financement public, la R-D industrielle, qui est mue par des considérations économiques, a tendance à privilégier les projets à court terme dont les résultats peuvent déboucher sur des applications pratiques. La plupart des projets de R-D portent sur les centrales existantes et la gestion des déchets radioactifs. Aucun projet de systèmes de réacteurs futurs n'est actuellement envisagé une fois achevée le projet AP 1400 (REP avancé).

Instituts de recherche

Malgré le vieillissement des chercheurs, on ne prévoit pas de départs massifs à la retraite à court terme. Cependant, les recrutements montent progressivement en puissance pour remplacer les chercheurs qui partent en retraite et pour remplir les nouveaux postes requis pour l'exécution de projet individuels.

Sur la base des contrats en cours en 2002, la part du financement public dans le financement total de la R-D nucléaire dépassait 80 %. Le financement public comprend des crédits d'État et une contribution de l'industrie. La plupart des recherches s'inscrivent dans un cadre national, car elles visent au développement d'une technologie originale et à l'autonomie en matière de technologie nucléaire. Cependant, on relève des activités intrinsèquement internationales telles que les activités de conseil et d'examen, les échanges d'experts, etc.

Les ressources humaines étant limitées, les activités de recherche menées en commun par l'industrie, les universités et/ou les organisations de recherche ont porté essentiellement sur la mise au point de technologies originales en matière, par exemple, de codes informatiques, d'expérimentation, d'analyse de la sûreté, etc.

La pyramide des âges dans les institutions de recherche est plus défavorable que dans l'industrie. Les étudiants les plus méritants et les plus brillants tendent à trouver des emplois hors du domaine nucléaire.

Le KAERI continue à offrir quelques cours de formation, notamment une formation sur des réacteurs de recherche s'adressant aux étudiants de premier et deuxième cycles en génie nucléaire dans le cadre d'un programme d'enseignement universitaire. Il a également créé une série de programmes d'enseignement et de formation sur Internet et prévoit de leur donner une dimension régionale avec la création, de concert avec l'AIEA et ses États membres dans la région, d'un Réseau asiatique d'enseignement supérieur sur la technologie nucléaire (*Asia Network of Higher Education on Nuclear Technology* – ANENT).

États-Unis d'Amérique

Dans le rapport par pays sur les États-Unis figurant dans le document *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*, il était stipulé que dans ce pays, « l'enseignement du génie nucléaire a présenté un déclin marqué au cours de la dernière décennie ». On y notait : « le nombre de programmes universitaires, d'étudiants inscrits, de diplômes décernés et de réacteurs de recherche dans les universités a fortement diminué. Certains faits donnent à penser qu'il existe un vieillissement du corps enseignant et une baisse du recrutement de jeunes étudiants à l'entrée des facultés. L'aptitude du système éducatif à maintenir une infrastructure éducative capable de fournir des ingénieurs convenablement formés pour l'industrie nucléaire existante et future serait menacée si la tendance actuelle perdurait ». Globalement, la situation concernant l'énergie nucléaire aux États-Unis s'est améliorée comme on le verra ci-après.

Contexte – Situation du secteur électronucléaire

Comme l'indiquait le rapport publié en 2000, aucune nouvelle centrale électronucléaire n'a été commandée aux États-Unis depuis 1978, mais grâce aux bonnes performances commerciales des 103 centrales existantes, on a enregistré depuis 1990 une augmentation de 200 milliards de kWh de la production électrique d'origine nucléaire. De 1999 à 2002, le taux de disponibilité des centrales est passé de 86,8 % à 91,5 %. À titre de comparaison, en 1990, le taux de disponibilité était inférieur à 65 %. De 1998 à 2001, le coût marginal de production de l'électricité d'origine nucléaire est tombé de 2,09 à 1,68 centime d'USD le kWh.

Ces améliorations des performances ont renforcé la confiance du public, des investisseurs et des autorités de sûreté à l'égard de l'industrie électronucléaire nationale. Il est crucial de maintenir ce niveau de confiance élevé pour l'exploitation à long terme des centrales nucléaires existantes, ainsi que pour l'avenir de la nouvelle génération de réacteurs nucléaires. Depuis l'an 2000, le ministère de l'Énergie (DOE) investit dans la recherche et le développement concernant le vieillissement des centrales existantes et l'optimisation de la production dans le cadre du Programme d'optimisation des centrales électronucléaires (*Nuclear Energy Plant Optimisation – NEPO*). Ce programme mené avec le secteur privé a privilégié des activités qui relèvent davantage du long terme. À l'avenir, le financement général de la R-D en faveur du parc nucléaire actuel visera l'amélioration de la production, la sûreté et les problèmes qui doivent être abordés pour assurer l'exploitation à long terme.

De nombreuses centrales nucléaires approchant les 40 ans, date d'expiration de leur période d'autorisation d'exploitation, la Commission de la réglementation nucléaire (*Nuclear Regulatory Commission – NRC*), a commencé à approuver, centrale par centrale, des demandes de prolongation de 20 ans de l'autorisation d'exploitation. À ce jour, la NRC a renouvelé les autorisations d'exploitation de 14 réacteurs. Elle étudie les demandes concernant 16 réacteurs supplémentaires et s'attend à en recevoir 25 de plus d'ici à 2006. Ces 55 réacteurs représentent plus de la moitié du parc en exploitation aux États-Unis. Des demandes de renouvellement devraient être également déposées pour les 48 réacteurs restants.

En 2001, le gouvernement des États-Unis a fait connaître sa politique énergétique nationale qui prône un rôle accru pour l'énergie nucléaire aux États-Unis, afin de répondre à la demande d'augmentation prévue de la puissance installée nécessaire pour couvrir la demande d'électricité en base. En octobre 2002, une Feuille de route pour l'installation de nouvelles centrales nucléaires aux États-Unis d'ici à 2010 (*Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010*) a été publiée sous les auspices du Comité consultatif de la recherche sur l'énergie nucléaire du ministère de l'Énergie. La Feuille de route recommande à l'industrie et au ministère de prendre des

mesures pour soutenir l'installation de nouvelles centrales nucléaires avancées aux États-Unis d'ici à 2010. Le ministère a créé le *Programme énergie nucléaire 2010* pour aider l'industrie à surmonter les obstacles à l'installation de nouvelles centrales nucléaires. Ce programme est un effort conjoint à coûts partagés gouvernement/industrie visant à identifier des sites, à mettre au point des technologies avancées et à dégager de nouveaux processus réglementaires débouchant sur la construction à brève échéance de nouvelles centrales nucléaires par le secteur privé. La mise au point des systèmes nucléaires de la prochaine génération en vue de leur déploiement d'ici à 2030 est en cours dans le cadre du programme Génération IV. Ces systèmes de Génération IV présenteront des améliorations significatives en matière de lutte contre la prolifération nucléaire, de durabilité, de sûreté et de fiabilité, et de performances économiques. Conjuguées avec l'approbation en juillet 2002 du site de Yucca Mountain pour la mise au point du premier dépôt de déchets nucléaires des États-Unis, ces initiatives constituent une marque appuyée d'engagement en faveur de l'énergie nucléaire.

Parallèlement à ces efforts, l'industrie électronucléaire a élaboré aux États-Unis son propre plan pour accroître la part de cette filière au cours des vingt prochaines années afin de pouvoir faire face à la croissance anticipée de la demande d'électricité. Ce plan, intitulé *Vision 2020 – Powering Tomorrow with Clean Nuclear Energy*, publié par le *Nuclear Energy Institute*, propose d'augmenter de 50 000 mégawatts électriques d'ici 2020 la contribution des nouvelles centrales nucléaires à l'alimentation électrique des États-Unis.

Situation générale de la main-d'œuvre et de l'enseignement

Pour atteindre ces nouveaux objectifs assignés à l'énergie nucléaire, encore faut-il pouvoir disposer de la main-d'œuvre indispensable. Une étude réalisée auprès des universités à la fin des années 1990 dans le cadre de l'analyse de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) concernant l'enseignement du génie nucléaire dans les pays membres dont les États-Unis, avait révélé que les étudiants hésitaient à se lancer dans des études nucléaires car le marché de l'emploi dans ce secteur était jugé peu porteur et que les perspectives à long terme pour les ingénieurs nucléaires n'étaient pas encourageantes. Depuis l'an 2000, les étudiants semblent attirés par une carrière nucléaire en raison d'un marché du travail nucléaire dynamique et des niveaux de salaires parmi les plus élevés dans le secteur technique. À l'heure actuelle, il semble y avoir une pénurie d'ingénieurs nucléaires qualifiés pour occuper les nombreux postes à prendre en raison des départs en retraite et de l'augmentation des investissements publics et privés dans la recherche nucléaire et les activités d'exploitation.

Il est crucial pour l'avenir de l'industrie nucléaire de recruter du personnel et de le retenir. Depuis l'an 2000, plusieurs groupes ont été constitués pour étudier les questions relatives à la main-d'œuvre dans le secteur nucléaire. Outre les études réalisées par l'intermédiaire de l'AEN et de l'Agence internationale de l'énergie atomique, une étude de l'*American Nuclear Society* (ANS) et une du *Nuclear Energy Institute* (NEI) ont conclu que, faute d'un effort gigantesque, la pérennité et la croissance de l'industrie nucléaire seront menacées par des pénuries de main-d'œuvre. L'étude du NEI comprend une évaluation comparative des ressources humaines et une analyse des activités de mise en œuvre. Ce travail a permis de dégager une série de bonnes pratiques et de points communs aux programmes réussis de recrutement et de fidélisation du personnel. Toujours d'après ce rapport, rien que pour maintenir le niveau actuel des opérations, il faudrait que, d'ici à 2010, 90 000 travailleurs se présentent sur le marché du travail aux États-Unis pour remplir les postes vacants dans 13 catégories d'emploi qui vont de l'ingénieur nucléaire au spécialiste en radioprotection en passant par le soudeur. Ainsi, malgré la tendance récente à l'augmentation des inscriptions en génie nucléaire dans les universités des États-Unis, ce pays se trouve, en matière de main-d'œuvre nucléaire, dans une situation périlleuse qui pourrait s'aggraver dans l'hypothèse d'une augmentation des besoins consécutive à la commande de nouvelles centrales nucléaires.

Depuis 2000, le nombre de réacteurs de recherche et de formation dans les universités des États-Unis est resté pratiquement constant. Il reste 27 réacteurs de recherche en exploitation dans des universités. Deux universités supplémentaires proposent un diplôme ou une option en génie nucléaire au niveau des second et troisième cycles. Alors que les inscriptions en premier et deuxième cycles en génie nucléaire avaient touché le fond en 1998 avec 480 étudiants, elles ont dépassé le millier en 2002.

Programmes lancés en 2000-2003

Au cours des trois dernières années, le DOE a organisé un atelier destiné aux professeurs de sciences des écoles secondaires en faisant appel aux ressources administratives et humaines de la Société américaine pour l'énergie nucléaire (*American Nuclear Society – ANS*). Il s'agit de familiariser aux principes de base de la science et de la technologie nucléaires les professeurs de sciences des écoles secondaires et intermédiaires qui, à leur tour éclaireront leurs collègues, puis leurs étudiants pour qu'ils soient informés de ce débouché professionnel. Le programme *University Partnership* a été lancé en 2000 pour amener les étudiants appartenant à des groupes minoritaires à s'intéresser au génie nucléaire. Il vise à mettre en œuvre des partenariats entre des établissements où est enseigné le génie nucléaire et des universités ayant vocation à accueillir des minorités de façon à permettre aux étudiants d'obtenir un diplôme nucléaire tout en suivant le reste de leur programme dans leur institution principale. Des partenariats ont effectivement été conclus entre cinq établissements d'enseignement du génie nucléaire et six universités de ce type. Plusieurs étudiants inscrits dans des institutions accueillant principalement des groupes minoritaires ont déjà obtenu leur diplôme en génie nucléaire et d'autres sont en passe de le faire.

On peut également citer un programme spécialisé destiné à promouvoir la radiochimie par le biais de bourses, d'un soutien au personnel enseignant et de l'élaboration de programmes d'étude, un nouveau programme de bourses octroyées à des étudiants diplômés intéressés par la propulsion nucléaire navale, ainsi qu'une nouvelle initiative importante en faveur des réacteurs de recherche et de formation universitaires et de l'infrastructure globale de l'enseignement du génie nucléaire dans les universités des États-Unis. Environ 6,5 millions de dollars (pour l'exercice fiscal 2003) ont été débloqués pour cette activité intitulée *Innovative Nuclear Infrastructure and Education (INIE)*. L'INIE encourage les universités à procéder à de nouveaux investissements à la fois dans leurs réacteurs de recherche et dans leurs programmes universitaires en génie nucléaire tout en instaurant des partenariats stratégiques avec des laboratoires nationaux et l'industrie nucléaire. À ce jour, six INIE régionaux réunissant 24 universités, un grand nombre de laboratoires nationaux et beaucoup de partenaires privés, notamment des compagnies d'électricité, ont été mis sur pied. Les subventions au titre de l'INIE sont prévues pour cinq ans à compter de l'exercice budgétaire 2002.

Le DOE n'est pas le seul organisme gouvernemental des États-Unis qui soutient l'enseignement du génie nucléaire. La Commission de la réglementation nucléaire (NRC) a mis en œuvre des programmes de stage spécifiquement destinés à embaucher des étudiants dans ses rangs. Les fonds contribuent aux appointements des étudiants et couvrent les droits et les frais de scolarité. Les étudiants doivent acquérir les compétences de base attendues par la Commission. L'ensemble des recherches subventionnées concerne des questions techniques spécifiques relatives aux performances des centrales nucléaires, y compris le renouvellement des autorisations et la prolongation de la vie des centrales.

Quant à la communauté universitaire, elle a mis en œuvre au cours des trois années passées des activités spécialement destinées à accroître la qualité et le nombre des étudiants qui s'inscrivent dans leurs programmes de génie nucléaire. Les universités se préoccupent du recrutement des étudiants et elles ont élaboré et lancé de nouvelles initiatives pour rendre leurs programmes plus attractifs. Elles

ont notamment amélioré le programme d'études, accru leurs effectifs, rénové leurs installations et élargi les débouchés, notamment pour les étudiants des premiers et deuxième cycles. Quelques universités ont emboîté le pas à d'autres en faisant appel à des spécialistes du recrutement qui se sont engagés à accroître le nombre des étudiants qualifiés. Ces spécialistes recherchent également des bourses d'étude, des bourses de recherche, des stages et des contrats de recherche pour les étudiants, d'où un allègement du fardeau financier pour les étudiants et les départements de génie nucléaire, facteur important pour maintenir l'engagement des universités en faveur du génie nucléaire dans une période financièrement difficile. L'action d'un spécialiste du recrutement semble être un élément décisif pour réussir à recruter et à retenir des étudiants dans le domaine du génie nucléaire.

L'industrie nucléaire des États-Unis a indiqué que la pénurie apparente de travailleurs nucléaires n'a pas eu d'impact appréciable sur les opérations en cours. Cependant, il a été noté que la réussite des plans d'avenir de l'industrie dépendront dans une large mesure du succès des efforts visant à renforcer la main-d'œuvre nucléaire du pays. L'industrie a chargé le *Nuclear Energy Institute* (NEI) d'élaborer un plan d'action global qui intègre la nécessité d'accroître le nombre de travailleurs qualifiés destinés à travailler dans l'industrie nucléaire. Le NEI a étudié les raisons qui poussent les jeunes ingénieurs à choisir le moment venu d'entrer ou non dans l'industrie nucléaire. Il a également effectué une évaluation comparative des ressources humaines et une analyse des activités de mise en œuvre. Ce travail a conduit le NEI à définir quatre domaines d'action prioritaires : remédier aux pénuries de spécialistes de la radioprotection, d'ingénieurs nucléaires, de soudeurs, de techniciens en radioprotection et d'artisans mécaniciens ; créer des partenariats avec des universités, collèges, écoles professionnelles, syndicats et autres groupes éducatifs pour recruter des travailleurs diplômés et non diplômés ; rehausser la visibilité et l'image de l'industrie nucléaire ; et faire pression sur les pouvoirs publics pour qu'ils apportent leur appui aux réacteurs universitaires et à des programmes de bourses d'étude et de recherche.

Ces dernières années, tous les Laboratoires nationaux ont pris des mesures pour améliorer, chacun à son niveau, la qualité de leur main-d'œuvre. C'est une question primordiale car tous les laboratoires connaissent un vieillissement de leur personnel qui atteint parfois une dimension épidémique puisque certains laboratoires prévoient que plus d'un tiers de leur personnel scientifique et technique prendra sa retraite dans les dix prochaines années. Les mesures suivantes ont été prises récemment pour devancer l'événement : organisation de cours d'été dans des domaines relatifs à l'énergie nucléaire destinés aux étudiants de deuxième et troisième cycle ; programmes de stages ; offre de nouveaux diplômes se rapportant au nucléaire à l'intention des employés en activité, notamment un certificat en énergie nucléaire appliquée et un programme d'enseignement théorique sur la physique des accélérateurs ; instauration de partenariats à long terme avec des universités nationales et étrangères ; appui à des bourses de recherche sur des sujets déterminés ; création d'alliances de recherche avec des universités pour formuler des demandes de subventions et mise en place de programmes de primes d'encouragement à la recherche universitaire administrés par le laboratoire concerné pour soutenir des activités en cours.

Aspects internationaux

La plupart des efforts qui ont été déployés pour améliorer la qualité de l'infrastructure nucléaire se sont inscrits dans une perspective et une logique nationales. Cela tient, pour beaucoup, à la situation moins que satisfaisante dans laquelle se trouvait l'infrastructure nucléaire aux États-Unis après des années de sous-investissement et un manque de coordination et de coopération entre le gouvernement fédéral, le monde éducatif, l'industrie et les compagnies d'électricité et les laboratoires nationaux. Du milieu à la fin des années 1990, une série d'initiatives et de programmes novateurs ont été lancés pour remédier à ces problèmes. Sous la houlette du ministère de l'énergie des États-Unis, l'industrie, les

laboratoires nationaux et d'autres organismes tels que l'ANS et le NEI ont commencé à travailler de concert pour replacer l'infrastructure nucléaire des États-Unis sur des bases saines. Certaines des conséquences des années de sous-investissement étaient irréparables, le pays ayant déjà perdu certains de ses réacteurs de recherche, des programmes et du personnel universitaires, des moyens industriels et ses étudiants les plus prometteurs et les plus brillants du moment. Les effets de cette période peuvent encore perdurer, mais le pire est passé. Maintenant que la scène nationale s'est stabilisée et améliorée, on peut à meilleur escient orienter l'attention et les ressources vers les aspects internationaux du soutien au nucléaire.

L'une des initiatives internationales du DOE a été le Programme international d'échange d'étudiants (*International Student Exchange Program - ISEP*) dans lequel des étudiants français, allemands et japonais étudient dans un laboratoire national aux États-Unis (généralement Argonne), tandis que des étudiants américains étudient dans ces trois pays. Ce programme fonctionne sans interruption depuis des décennies, mais il n'a pas changé d'échelle. D'autres initiatives internationales ont été mises en route et, en 2001, l'Initiative internationale pour la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire (*International Nuclear Energy Research Initiative - I-NERI*) a lancé une activité pour lever des fonds pour la recherche aux États-Unis en parallèle à des fonds provenant d'autres pays par le biais d'accords de partage des coûts. Le programme I-NERI se fixe pour objectif un partage égalitaire des dépenses avec chaque pays partenaire.

Plus récemment, l'Initiative pour des cycles du combustible avancés (*Advanced Fuel Cycle Initiative – AFCI*) a pris une dimension internationale (travaux sur les cycles du combustible avec la France et la Suisse) grâce à des contributions à des projets en collaboration qui portent sur la conception et la construction de nouveaux appareillages d'essai dans des installations existantes. L'AFCI comporte quelques contraintes, liées au contrôle à l'exportation et à la sécurité nationale, qui limitent la portée de la collaboration internationale dans les technologies de la transmutation. Cela ne s'est pas révélé un obstacle sérieux dans les programmes en collaboration en cours. L'AFCI soutient la recherche dans les universités des États-Unis et dans le monde entier grâce à la participation de plus de 135 étudiants associés au programme. Plus généralement, comme beaucoup de projets de recherche nucléaire menés par le gouvernement des États-Unis soutiennent le développement de l'énergie en général, ils contribuent de façon non négligeable au développement de l'énergie nucléaire au plan international. Dans le programme Génération IV, les États-Unis sont l'un des dix pays qui ont conjugué leurs efforts pour mettre au point les systèmes de réacteurs nucléaires de demain, qui maintient une base de compétences nationale et internationale solide.

L'Institut de recherche sur l'énergie électrique (*Electric Power Research Institute – EPRI*) participe à plusieurs projets en collaboration avec des membres internationaux autorisés à exploiter des centrales électriques commerciales. Les partenaires internationaux de l'EPRI ont fondamentalement les mêmes droits et responsabilités que les membres nationaux et la collaboration internationale se manifeste par une participation multilatérale à tous les aspects des activités de l'EPRI concernant la planification des programmes de R-D nucléaire, la mise au point de produits et le transfert de technologies. Nombre des accords contiennent des dispositions visant le détachement réciproque de personnel, l'échange de données et la réalisation de recherches spécifiques dans les pays membres. L'EPRI chiffre à environ 40 millions de dollars des États-Unis le montant annuel de son financement international (y compris la valeur estimée des données partagées).

Aux États-Unis, la coopération internationale est encouragée dans les domaines suivants : Génération IV de façon à pouvoir élaborer des systèmes énergétiques nucléaires avancés dans un contexte de collaboration ; l'AFCI où l'élargissement de la coopération internationale est largement justifié par l'étendue de la base des connaissances internationales et le libellé de la législation du Congrès et enfin l'I-NERI où la coopération internationale conduit à une utilisation rationnelle des fonds.

Les restrictions à la collaboration internationale sont peu nombreuses ; elles toucheraient le financement du programme du projet de Yucca Mountain en application de la Loi relative à la politique concernant les déchets nucléaires, le NERI, qui est limité aux laboratoires du DOE, et beaucoup de bourses de recherche et d'étude qui sont réservées aux citoyens des États-Unis.

Depuis les événements du 11 septembre 2001, des restrictions supplémentaires ont été imposées concernant les visas d'étudiants et l'accès aux installations nucléaires par des ressortissants étrangers. Cela suppose de nouvelles dispositions concernant le contrôle des exportations et les méthodes de recrutement des laboratoires nationaux. En dépit de ces nouvelles mesures, le gouvernement des États-Unis appuie la collaboration internationale dans presque toutes les technologies liées à l'énergie nucléaire. La transparence des informations produites par chaque projet international est régie par l'accord international et les règles de contrôle des exportations de chaque pays participant.

Conclusion

Au cours des quatre dernières années, d'importants progrès ont été accomplis. Les nouveaux programmes, ainsi que les programmes déjà en place avant 2000, ont contribué à renforcer l'infrastructure nucléaire universitaire en soutenant les activités de recherche, l'amélioration des installations et le corps professoral, d'où une augmentation spectaculaire du nombre d'étudiants de premier et deuxième cycles inscrits en génie et en sciences nucléaires.

À l'évidence, les programmes entrepris en coopération avec l'industrie, les universités, les laboratoires et la communauté internationale, tels que Génération IV, NERI, I-NERI, APCI, NEPO et récemment 2010, ont tous favorisé la recherche dans des domaines indispensables et permis de mieux cerner les besoins futurs en matière de développement nucléaire. Pour autant, l'infrastructure nucléaire des États-Unis demeure confrontée à quelques problèmes persistants plus difficiles à appréhender que les difficultés antérieures. L'image de l'énergie et de la technologie nucléaires s'est indubitablement améliorée, mais il reste encore beaucoup à faire pour former la prochaine génération d'étudiants et la sensibiliser aux avantages et aux perspectives de cette technologie.

En dépit du chemin parcouru dans les universités pour préserver les réacteurs, les programmes et le personnel, et attirer les étudiants vers les programmes nucléaires, les réductions budgétaires au niveau de l'État risquent d'annuler une bonne partie des progrès réalisés car les gestionnaires réagissent en cherchant à réduire les programmes et les budgets. Les programmes nucléaires, généralement moins importants que ceux des autres disciplines scientifiques, pourraient être absorbés et perdre leur identité du fait des progrès du dogme de la consolidation parmi les autorités universitaires. En outre, les mesures de sécurité qui sont mises en place pour respecter les nouvelles réglementations de la NRC peuvent être très lourdes en termes d'argent et de personnel. Les augmentations de coûts induites par ces mesures ne peuvent pas être prises en charge par les universités, car certains administrateurs universitaires aux abois pourraient, prétextant qu'elles aggraveraient les difficultés budgétaires de leurs universités, trouver là un argument supplémentaire pour supprimer les programmes nucléaires. Il pourrait incomber au gouvernement fédéral de financer toute mesure supplémentaire de sécurité imposée par la NRC. C'est une question qu'il faudra suivre de près.

La bon coté de la médaille c'est que nombre des obstacles auxquels est confrontée l'infrastructure nucléaire aux États-Unis ont été surmontés grâce à la coopération de tous les secteurs : gouvernement, universités, industrie et compagnies d'électricité, laboratoires nationaux, associations professionnelles et groupes d'intérêt, d'une façon qu'il n'était pas possible de prévoir ni d'envisager à la fin des années 1990, quand a été réalisée l'étude précédente de l'AEN. Le mauvais coté, ce sont les nouvelles

préoccupations concernant les finances publiques et le durcissement des impératifs de sécurité. L'aptitude à instruire et à former les générations présentes et futures d'experts nucléaires avant la perte de vastes pans de connaissances institutionnelles en possession de la génération qui part actuellement à la retraite demeure un sujet de préoccupation. Ces problèmes semblent surmontables, compte tenu des résultats obtenus à ce jour et sachant que la communauté nucléaire des États-Unis est mieux préparée et organisée, et certainement plus sensibilisée aux problèmes d'infrastructures qu'elle ne l'a jamais été.

Finlande

Contexte

L'énergie nucléaire occupe une place importante dans la production d'électricité en Finlande depuis le début des années 1980. À l'heure actuelle, l'électricité d'origine nucléaire représente 27 % de la production totale d'électricité. Les centrales nucléaires ont affiché des taux de disponibilité très élevés, des prix de production de l'électricité concurrentiels et des faibles niveaux d'émissions radioactives. Depuis 1983, le taux de disponibilité annuel moyen a, presque sans exception, dépassé 90 %. L'exploitation des quatre réacteurs finlandais s'est déroulée de façon sûre et fiable. La rentabilité a été encore accrue par les travaux de modernisation, notamment des augmentations considérables de la puissance nominale (voir tableau 3) réalisées sur la totalité des tranches, les dernières en date à la fin des années 1990.

En mai 2002, le Parlement finlandais a ratifié la décision de principe prise antérieurement par le gouvernement sur une cinquième tranche nucléaire. Cette décision de principe signifie que la construction est considérée conforme à l'intérêt général. La principale justification de l'accroissement du parc nucléaire est la volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les bons antécédents des centrales nucléaires existantes, la stabilité du prix de l'électricité d'origine nucléaire et la pauvreté de la Finlande en ressources énergétiques nationales ont également pesé dans cette décision.

Tableau 3. **Centrales nucléaires finlandaises**

Tranche	Type	Puissance installée nette (MWe)	Exploitation commerciale
Loviisa 1	VVER-440	440 → 488	1977
Loviisa 2	VVER-440	440 → 488	1981
Olkiluoto 1	BWR	660 → 710 → 840	1979
Olkiluoto 2	BWR	660 → 710 → 840	1982

La compagnie d'électricité Teollisuuden Voima Oy (TVO) poursuit actuellement les préparatifs pour la construction de la nouvelle centrale nucléaire. TVO a décidé en octobre 2003 que la nouvelle tranche serait implantée à Olkiluoto et a signé en décembre avec le consortium Framatome ANP un contrat pour la construction d'une nouvelle tranche équipée d'un réacteur à eau pressurisée d'environ 1 600 MWe. En janvier 2004, TVO a soumis au gouvernement une demande de permis de construction. Si tout se passe normalement, l'exploitation commerciale de la nouvelle tranche pourrait commencer d'ici à la fin de la décennie. La durée de vie utile nominale de la tranche sera d'environ 60 ans. Il est donc extrêmement important pour la Finlande de s'assurer de la disponibilité de compétences nucléaires à long terme.

Gestion des déchets radioactifs et du combustible irradié

La gestion des déchets nucléaires et le stockage du combustible irradié progressent conformément au plan à long terme sous un contrôle strict des autorités de sûreté. Les arrangements financiers relatifs à la gestion des déchets sont clairement définis dans la loi et des fonds suffisants ont déjà été réunis.

Le 16 mai 2001, le Parlement finlandais a ratifié à une majorité écrasante (157 voix contre 3) la décision de principe du gouvernement concernant la mise en place d'une installation de stockage final – Eurajoki – pour le combustible nucléaire irradié à Olkiluoto. La décision vise le combustible irradié résultant de l'exploitation des centrales nucléaires finlandaises existantes. Une seconde décision de principe ratifiée par le Parlement en 2002 a augmenté la capacité de l'installation de stockage final pour lui permettre de recevoir le combustible irradié produit par la nouvelle centrale nucléaire. Au total, l'installation de stockage final pourra contenir 6 500 tonnes combustible nucléaire irradié.

Le choix du site permet à Posiva, l'entreprise conjointe TVO/Fortum Power and Heat Oy chargée de gérer le combustible irradié, d'approfondir ses travaux d'investigation du sous-sol rocheux à Olkiluoto où sera construite dans les toutes prochaines années une installation souterraine de caractérisation de la roche, ONKALO. D'après les plans, la construction d'ONKALO débutera pendant l'été 2004 ; les études à la profondeur de stockage final pourront commencer aux alentours de 2006.

En juin 2001, Posiva et la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) ont conclu des accords de coopération et d'échange d'informations sur la recherche et la technologie concernant le combustible nucléaire irradié.

Opinion publique

Les Finlandais manifestent un soutien croissant à l'énergie nucléaire. Une enquête réalisée en octobre 2003 a montré que 45 % des Finlandais étaient favorables à l'énergie nucléaire en général contre 28 % qui y étaient opposés. À titre de comparaison, dix ans auparavant, 29 % étaient pour et 43 % contre. De même, le degré d'acceptation par le public du dépôt final à Olkiluoto (Eurajoki) est élevé. D'après un sondage récent, une nette majorité d'environ 60 % des habitants de la municipalité d'Eurajoki accepte l'implantation de l'installation de stockage à Olkiluoto.

Au cours de l'année 2002, la construction de la nouvelle tranche nucléaire en Finlande a suscité des débats animés dans les médias. Le processus s'est achevé par le vote parlementaire du 24 mai 2002 lorsque la mise en œuvre de la décision de principe a été approuvée par 107 voix contre 92.

Recherche-Développement

En Finlande, la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire a été répartie entre divers groupes et unités de recherche qui déploient leurs activités dans différents instituts de recherche publics, universités, compagnies d'électricité et bureaux d'étude. La R-D nucléaire est axée sur la sûreté et les performances d'exploitation des centrales nucléaires, la gestion et le stockage des déchets, et la fusion. Le financement de ces trois principaux thèmes se décompose comme suit : sûreté des centrales nucléaires 40 %, gestion des déchets 50 % et fusion 10 %. S'agissant de la sûreté des centrales nucléaires, près de 40 % de la recherche est effectuée dans le cadre de programmes de recherche publics. Pour ce qui est de la gestion des déchets, 8 % seulement de la recherche est réalisée

dans le cadre de programmes de recherche publics. Au total, on estime à 200 personnes-années les effectifs de la recherche affectés à la fission et à la fusion nucléaires, pour un financement global d'environ 27 millions d'euros.

Le nombre d'experts travaillant à temps plein dans l'énergie nucléaire a toujours été très limité en Finlande. C'est pourquoi dans les débuts de l'ère nucléaire en Finlande, chaque spécialiste s'est trouvé dans l'obligation de couvrir un éventail relativement large du champ des disciplines nucléaires. Si le financement en faveur de la R-D continue sur sa pente descendante, il deviendra de plus en plus difficile de garantir un niveau de compétences adéquat dans la totalité des domaines nucléaires.

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, la recherche publique est une source d'expertise objective. Elle contribue à maintenir les effectifs et les équipements nécessaires pour la recherche et le développement ; elle a aussi fixé le cadre de la collaboration internationale. En Finlande, la recherche publique dans le domaine de l'énergie nucléaire se déploie dans plusieurs programmes de recherche nationaux. Les objectifs de ces programmes ont été largement alignés sur les domaines et les priorités de recherche des grands programmes internationaux ayant pour cadre l'Union européenne, l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE et les pays nordiques. La Finlande juge important que les travaux sur les centrales nucléaires de demain comportent des recherches associant objectifs à long terme et modèles évolutifs.

Le programme national FINNUS (1999-2002), qui privilégie les thèmes du vieillissement, des accidents et des risques, a été coordonné et principalement réalisé par le Centre de recherche technique de Finlande (VTT) avec d'importantes contributions de l'Université de technologie de Lappeenranta (LUT). Le programme SAFIR (2003-2006) prolonge ce travail avec un champ de recherche quelque peu élargi et la participation de plusieurs organisations. Il élabore des instruments et des pratiques à l'intention des autorités de sûreté et des compagnies d'électricité, et leur fournit un cadre auquel se référer pour prendre des décisions en matière de sûreté.

Le programme SAFIR joue un rôle important dans la formation de nouveaux spécialistes nucléaires et le transfert de connaissances en Finlande. Il constitue un réseau national intégré pour l'échange d'informations entre chercheurs et organisations. Quelque 130 personnes participent actuellement (à temps partiel ou à temps plein) à des projets de recherche relevant du programme SAFIR. En outre, 80 personnes appartenant à l'autorité de sûreté STUK, aux compagnies d'électricité Fortum et TVO, au VTT, à des universités et à d'autres organisations siègent dans le groupe de pilotage et les six groupes de référence du programme SAFIR, qui supervisent et coordonnent les activités.

Le programme public de gestion des déchets nucléaires, JYT 2001 (1997-2001) s'est achevé par l'approbation du choix du site de stockage. Cependant, il a été décidé de poursuivre les activités de recherche publiques sur la gestion des déchets nucléaires, d'où le lancement du programme de recherche sur la gestion des déchets nucléaires, KYT (2002-2005), qui est essentiellement axé sur la gestion et le stockage définitif du combustible nucléaire irradié. Il s'agit en l'occurrence de favoriser le maintien et le développement du savoir-faire scientifique essentiel pour la gestion des déchets nucléaires. À côté de la politique de base choisie par la Finlande en matière de gestion du combustible irradié, fondée sur le stockage définitif direct dans une formation rocheuse, le programme envisage également d'autres solutions éventuelles pour la gestion du combustible irradié.

Les modalités de financement des deux programmes nationaux (SAFIR et KYT) ont été modifiées par une nouvelle législation qui est entrée en vigueur au début de 2004 et qui met la plus grosse part du financement à la charge des exploitants nucléaires.

En Finlande, les recherches sur l'énergie de fusion sont menées par l'Agence nationale de technologie (TEKES) dans le cadre du programme FFUSION 2 (1999-2002) qui a été reconduit jusqu'en 2006. Ces activités sont totalement intégrées dans le programme d'Euratom sur la fusion.

Les principaux instituts de recherche et universités engagés dans la recherche nucléaire sont le Centre de recherche technique de Finlande (VTT), le Service géologique de Finlande, l'Université d'Helsinki, l'Université de technologie de Lappeenranta (LUT), l'Université de technologie d'Helsinki (HUT), l'Institut météorologique finlandais et le Centre finlandais de radioprotection et de sûreté nucléaire. En tant qu'autorité nationale responsable des questions liées au rayonnement, le STUK possède les laboratoires de physique des rayonnements et de radiochimie nécessaires pour contrôler la radioactivité dans l'environnement.

Le VTT est un centre de recherche national pluridisciplinaire qui mène plusieurs activités en génie nucléaire dans ses unités opérationnelles accessibles par le biais du portail de l'unité *VTT Nuclear*. L'unité *VTT Processes* est très compétente dans les domaines de la physique des réacteurs et des calculs thermo hydrauliques, ainsi que dans l'analyse de la sûreté de la gestion des déchets nucléaires. Elle exploite également le réacteur de formation et de recherche Triga dont le principal champ de recherche est actuellement le traitement des tumeurs cérébrales par la capture de neutrons par le bore. L'unité *VTT Industrial Systems* a des cellules chaudes pour les matériaux non transuraniens et son champ de recherche englobe le vieillissement, l'intégrité structurale et la gestion de la durée de vie, ainsi que l'automatisation des centrales pour la modernisation et la planification des systèmes d'instrumentation et de contrôle (I&C).

Enseignement universitaire dans le domaine de l'énergie nucléaire

En Finlande, trois universités proposent une formation de base dans les sciences nucléaires : l'Université de technologie de Lappeenranta (LUT), l'Université de technologie d'Helsinki (HUT) et le laboratoire de radiochimie de l'Université d'Helsinki. Les unités universitaires ayant des programmes d'étude, par exemple en physique nucléaire ou en physique des hautes énergies, ne sont pas prises en compte ici. Ces trois universités proposent des Masters en sciences et des programmes d'études supérieures pouvant déboucher sur un diplôme de doctorat.

Au total, 10 à 20 Masters en génie nucléaire sont décernés chaque année, ce qui a été suffisant à ce jour. Toutefois, la demande de nouveaux diplômés augmente principalement en raison du projet de nouvelle centrale nucléaire, ainsi que du départ à la retraite de la première génération de spécialistes. Le doublement du nombre des étudiants inscrits dans les cours de génie nucléaire en 2003 est un signe très encourageant. À l'évidence, le redémarrage du programme de construction du parc nucléaire en Finlande a eu un effet positif.

Université de technologie de Lappeenranta (LUT), Département de l'énergie et de la technologie environnementales, Laboratoire de génie nucléaire

La LUT a récemment (2001) dissocié le génie en énergie nucléaire de la technologie des centrales électriques pour en faire une discipline à part entière et mettre en valeur l'énergie nucléaire aux yeux des étudiants qui choisissent leurs priorités. Tous les étudiants en technologie énergétique sont tenus de suivre le cours de base en génie électronucléaire. Un enseignement complémentaire est dispensé à tous les étudiants en technologie des centrales électriques. Plusieurs cours supplémentaires sont offerts aux étudiants qui se spécialisent en génie électronucléaire.

Le principal domaine de recherche est la sûreté des centrales nucléaires, dans laquelle la modélisation du transfert de chaleur et de la dynamique des fluides occupe une place privilégiée. L'unité de recherche sur la sûreté nucléaire est le lieu de recherches expérimentales et d'analyses concernant la sûreté grâce, notamment, à sa boucle thermo hydraulique PACTEL, qui simule le circuit primaire de tranches de type VVR-440 à une échelle de 1:305, avec une puissance calorifique maximum de un MW. Des études sur des systèmes de sûreté passive et la gestion des accidents graves ont été réalisées pour des types de réacteurs à eau ordinaire avancés. Le laboratoire de physique de la LUT dispose d'une unité de mesure des rayonnements. Des visites du réacteur de formation et de recherche Triga au VTT sont organisés dans le cadre du cours sur la physique des réacteurs.

Université de technologie d'Helsinki (HUT), Département de génie physique et mathématiques, Laboratoire des systèmes énergétiques avancés

À l'Université de technologie d'Helsinki, le programme de génie nucléaire est partie intégrante du programme d'étude en génie physique. Le laboratoire des systèmes énergétiques avancés enseigne aussi bien l'énergie nucléaire (fission et fusion) que les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire, par exemple. Les principaux thèmes de recherche sont la technologie de la fusion et la physique des rayonnements. La synergie entre les technologies de la fission et de la fusion a été pleinement exploitée dans la formation des étudiants, notamment en ce qui concerne l'analyse de la sûreté nucléaire. L'unité possède un laboratoire de mesure des rayonnements et peut également utiliser le réacteur de formation et de recherche Triga, les cellules chaudes et le laboratoire radiochimique du VTT, regroupés sur le même campus.

Université d'Helsinki, Département de chimie, Laboratoire de radiochimie

La radiochimie est l'une des sept branches de la chimie représentées à l'Université d'Helsinki. Les étudiants suivent un programme d'une durée de trois ans en chimie inorganique, organique et physique, complété par des études spécialisées en radiochimie d'une durée minimum de deux ans. Le programme de radiochimie propose également aux étudiants des cours dans les autres branches de la chimie, ainsi qu'une formation complémentaire destinée aux enseignants. Les principaux thèmes de recherche sont la gestion et le stockage final des déchets radioactifs, la radiochimie de l'environnement, l'épuration des effluents au moyen d'échangeurs d'ions et la chimie des rayonnements. Les installations de recherche et d'enseignement se sont récemment enrichies d'un nouveau cyclotron.

Coopération dans le domaine de l'enseignement

Une des spécificités de l'enseignement des universités techniques finlandaises est que le travail pour l'obtention des diplômes est souvent réalisé en entreprise, dans des centrales nucléaires, dans des centres de recherche, ou au sein de l'autorité de sûreté. Cela permet de concilier harmonieusement la théorie et la pratique ; l'obligation de suivre des stages de formation pendant les mois d'été va dans le même sens. En offrant des postes stimulants et intéressants pour la formation et les thèses, les organisations nucléaires peuvent fortement influencer le recrutement de nouveaux étudiants. On peut aussi améliorer sensiblement la qualité de l'enseignement en invitant des conférenciers externes et en organisant des activités de recherche dans des laboratoires dotés d'équipements ultramodernes. Malheureusement, on constate depuis peu une baisse du financement indispensable pour ce type de pratiques. C'est pourquoi une bonne coopération entre les universités, les autorités, les compagnies d'électricité et les organismes de recherche est essentielle à la formation de la nouvelle génération de spécialistes.

Classiquement, les diplômes d'enseignement supérieur sont décernés à des personnes qui mènent une carrière professionnelle normale tout en suivant des cours à l'université, le sujet de la thèse étant généralement étroitement lié à des projets de recherche en cours. Le VTT encourage vivement ses employés à suivre des études supérieures. La pratique du temps partiel conduit à un allongement sensible du temps nécessaire pour l'obtention des diplômes. Un assez grand nombre d'ingénieurs nucléaires poursuivent des études supérieures.

À l'automne de 2002, les organisations finlandaises ont réévalué la situation en matière de main-d'œuvre et chargé un groupe de travail d'élaborer et d'organiser une formation professionnelle de base de haut niveau pour les nouvelles recrues et leur personnel en place. Il s'agissait surtout de répondre aux besoins urgents découlant du projet de nouvelle centrale nucléaire, mais aussi d'assurer dans le long terme la relève de la présente génération d'experts nucléaires qui va prendre sa retraite dans les dix années à venir.

Le groupe a décidé d'organiser sans tarder un cours de formation national sur la sûreté nucléaire s'inspirant d'un cours analogue mis au point par l'AIEA. L'approche adoptée vise à prendre en compte les points de vue de l'ensemble des organisations. La moitié des 120 conférenciers sont fournis par les compagnies d'électricité nucléaire, un quart par l'autorité de sûreté (STUK), les autres appartenant au VTT et au monde universitaire. Les 51 participants aux cours viennent des mêmes organisations. Les cours sont également disponibles dans les pages Internet de la LUT ; on peut les consulter à l'avance et les étudiants diplômés peuvent également s'y référer. Les cours durent six semaines, de septembre 2003 à février 2004, et se tiennent tantôt dans une organisation, tantôt dans une autre.

Le programme sera reconduit en Finlande l'année prochaine et il a été suggéré de transposer l'expérience acquise au projet NEPTUNO de la CE. Compte tenu de l'ampleur des besoins au plan national, aucun étudiant ni conférencier étranger n'a participé à cette première session. Cependant, le programme avait un contenu international et rien ne s'oppose à l'organisation ultérieure de cours analogues sur une base plus internationale.

L'HUT et la LUT ont adhéré en 2003 au « Réseau européen pour l'enseignement des sciences nucléaires » (ENEN) dont l'objectif est de promouvoir une formation et une coopération nucléaires harmonisées entre les universités européennes et elles ont été parmi les membres fondateurs de la *World Nuclear University* (WNU) qui prône une collaboration mondiale en matière de mobilité et d'enseignement.

Formation

Les deux entreprises électronucléaires finlandaises sont convaincues que la compétence du personnel est un élément crucial dans la gestion et l'essor de l'entreprise. Toutes deux ont des programmes de formation bien établis pour leur personnel à un niveau non universitaire, (ingénieurs, techniciens, personnel d'exploitation, etc.). Chaque centrale a un centre de formation équipé d'un simulateur intégral. En outre, les centrales ont des laboratoires classiques pour la chimie et la mesure des rayonnements. Le personnel de niveau universitaire des compagnies d'électricité participe occasionnellement à des cours, des séminaires et des conférences de portée internationale, ainsi qu'à des ateliers et des comités techniques organisés, par exemple, par l'AIEA, l'OCDE/AEN et WANO. Toutes les tranches ont été modernisées dans les années 1990 et ces programmes de modernisation étaient assortis d'un important volet de formation destiné au personnel des centrales.

Lors de la réorganisation de la centrale de Loviisa au début de 2002, le transfert de connaissances et d'expérience par les membres du personnel « d'origine » à la nouvelle génération a retenu la plus grande attention. La création de Fortum Nuclear Services en tant qu'entreprise distincte à l'intérieur de la société et le partenariat avec la centrale de Loviisa pour la préservation des compétences requises dans les domaines pertinents garantissent la R-D indispensable dans des disciplines critiques telles que la physique des réacteurs, les phénomènes thermo hydrauliques, la technologie des matériaux, le combustible et les déchets nucléaires. Les programmes de R-D sont considérés comme un instrument important qui permet de proposer à de jeunes scientifiques de travailler sur des projets, puis de leur offrir ultérieurement un emploi permanent d'expert.

La compagnie d'électricité TVO a réalisé une enquête sur les connaissances et fait le bilan de ses besoins en matière de compétences dans la perspective de son développement lié à la construction de la cinquième tranche nucléaire en Finlande. TVO met également en place des mécanismes de transfert des connaissances pour assurer la relève du personnel qui part en retraite. Dans les prochaines années, TVO recrutera du personnel d'exploitation et de maintenance pour la centrale Olkiluoto 3. Un programme d'enseignement sera mis sur pied pour ce personnel, y compris une formation faisant appel à un simulateur intégral spécifique à la centrale.

L'autorité de sûreté (STUK) perfectionne les membres de son personnel au moyen d'un programme de formation interne et d'apprentissage sur le tas. De nouveaux employés fraîchement émoulus des universités techniques (HUT et LUT) ont été recrutés récemment pour devenir inspecteurs à l'issue d'une procédure de formation appropriée. S'agissant des besoins liés au projet de nouvelle centrale nucléaire, du personnel plus expérimenté a également été embauché et reçoit la formation requise. Le STUK a également envoyé du personnel embauché depuis peu dans d'autres organisations de réglementation (USNRC) pour y acquérir une formation internationale.

France

Panorama général

Situation de l'énergie nucléaire en France

Environ quatre-vingts pour cent de l'électricité produite en France est d'origine nucléaire et la continuité caractérise la politique française dans ce domaine. Comme un débat public sur la politique énergétique l'a montré récemment, l'opinion publique française est assez neutre au sujet de l'énergie nucléaire et les responsables politiques sont dans leur grande majorité favorable au maintien de l'option nucléaire.

La principale entreprise d'électricité nationale (Électricité de France, EDF) est actuellement une société publique, mais elle se prépare à ouvrir son capital aux investisseurs privés. Ce changement profond ne devrait pas avoir une grande influence sur la politique nucléaire d'EDF.

Le groupe AREVA, qui réunit la plupart des entreprises françaises du secteur nucléaire, est un autre acteur de premier plan dans le paysage nucléaire français. Ce groupe, détenu par l'État, a tiré parti des fusions opérées dans ce secteur pour devenir un acteur majeur dans le domaine nucléaire au plan mondial.

L'outil industriel exploité par le groupe AREVA (les installations du cycle du combustible à travers COGEMA et la construction des réacteurs nucléaires à travers FRAMATOME ANP) est surdimensionné par rapport aux besoins nationaux et il est résolument tourné vers l'exportation. Grâce à son parc nucléaire composé de 58 réacteurs, EDF est elle aussi en mesure d'exporter une part de sa production d'électricité.

Recherche et développement

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) est le principal acteur dans le domaine de la R-D nucléaire en France, mais d'autres instituts comme le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et les universités jouent également un rôle important.

Compte tenu de l'état de l'outil industriel, qui requiert moins de développement qu'auparavant, le budget de la R-D nucléaire diminue légèrement depuis cinq ans en France.

La R-D relative au développement des filières nucléaires du futur progresse dans le cadre du Forum international Génération IV. Un important programme de recherche a également été consacré à la gestion des déchets radioactifs à la suite de l'entrée en vigueur de la loi de 1991 relative aux recherches sur ce sujet.

Ressources humaines

L'outil nucléaire national (parc nucléaire d'EDF et usines d'AREVA) a imposé un effort de développement considérable au cours des dernières décennies, mais il est aujourd'hui parvenu à maturité pour l'essentiel. L'exploitation de cet outil industriel développé requiert un grand nombre de personnes qualifiées et formées.

Carrières

Tous les acteurs majeurs du secteur nucléaire français (CEA, AREVA, EDF) proposent des carrières dans les activités nucléaires, carrières qui se caractérisent par des rémunérations moyennement attractives et une excellente stabilité dans des emplois permanents.

Dans le domaine nucléaire, les transferts de personnel entre ces trois grands employeurs sont relativement aisés. Il existe aussi des liens historiques entre ces trois entreprises, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) et l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Ce tableau autorise des carrières variées qui donnent une bonne vision de l'ensemble du système nucléaire. Un cycle de formation supérieure dans le domaine nucléaire (CFS) est destiné aux futurs dirigeants de ces organismes. Ces possibilités de mobilité thématique contribuent efficacement à maintenir et renforcer les compétences dans le pays.

Expertise

Les trois grands acteurs français du domaine nucléaire (CEA, AREVA, EDF) ont identifié une population d'experts clés et les utilisent dans des réseaux qu'il est possible de solliciter à volonté pour des conseils scientifiques et techniques dans leurs domaines de compétence.

Le risque de perte de compétence dans le domaine nucléaire est probablement moindre en France que dans les autres pays européens parce que l'énergie nucléaire continue d'engendrer un très gros volume d'activité dans le pays. Cependant, les longues constantes de temps caractéristiques du domaine nucléaire sont partout les mêmes et l'expertise tend à disparaître dans quelques domaines techniques bien définis qui ont été étudiés dans le passé et qui sont susceptibles de redevenir d'actualité dans l'avenir (comme la séparation isotopique, par exemple). Dans d'autres domaines comme le démantèlement, en dépit de leur importance économique, il n'y a jamais eu de véritable émergence d'une expertise. Les solutions éventuelles passent par la collaboration internationale ou par des alliances industrielles à caractère international.

Éducation et formation

En France, l'effort d'éducation dans le domaine nucléaire a été globalement maintenu au cours des dix dernières années. Contrairement à une idée répandue, le flux net d'étudiants en sciences n'a pas diminué pendant cette période. De même, la population d'étudiants attirés par le domaine nucléaire est stable et aux recrutements traditionnels des élites sortant des écoles d'ingénieurs s'ajoute désormais une population croissante d'étudiants venant de l'université.

L'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est l'institut français qui dispense un enseignement de deuxième et troisième cycle et des formations continues dans le domaine des sciences et techniques nucléaires au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA).

L'INSTN offre des équipements uniques pour une pédagogie active et organise des enseignements académiques nationaux et internationaux de haut niveau, des formations continues, des ateliers et des conférences à l'intention des étudiants, des ingénieurs, des techniciens et des chercheurs dans tous les domaines scientifiques liés aux applications de l'énergie nucléaire. Il est considéré comme l'instrument du CEA pour la diffusion des connaissances auprès de ses partenaires industriels actifs dans le secteur nucléaire, de l'université et du secteur médical.

L'institut emploie environ 110 personnes composant le personnel administratif et enseignant permanent et fait appel à un millier de collaborateurs externes.

Les enseignements dispensés par l'INSTN sont conçus pour mettre les étudiants en contact direct avec des spécialistes qui pratiquent quotidiennement les disciplines enseignées. L'INSTN s'appuie sur le vaste potentiel de recherche du CEA et, en particulier, sur ses centres de Saclay, de Grenoble et de Cadarache. La doctrine éducative de l'INSTN se fonde sur une interaction poussée avec des spécialistes présentant des profils professionnels et scientifiques différents. Les professeurs et les chargés de cours viennent de l'université, du CNRS, des centres du CEA, d'EDF et de sociétés nucléaires françaises (groupe AREVA, notamment).

Un statut spécial d'enseignant-chercheur a été créé récemment au CEA pour valoriser les activités d'enseignement de ses agents tout en leur conférant une reconnaissance officielle.

L'enseignement des techniques nucléaires en France s'inscrit dans le cadre d'un programme de spécialisation en génie atomique. Contrairement au système éducatif américain, on ne trouve pas de cycle académique complet en génie atomique au niveau du troisième cycle dans les universités françaises. Certes, il existe des programmes universitaires en physique nucléaire, en matières nucléaires, en radiochimie et dans d'autres disciplines, mais le regroupement de tous ces domaines théoriques et pratiques en un ensemble qui mérite le nom de « génie atomique » ne se rencontre que dans le cours de génie atomique de l'INSTN. Depuis 1956, date à laquelle ce cours a été mis en place, quelque 4400 étudiants ont obtenu leur diplôme d'ingénieur en génie atomique.

L'INSTN a aussi tissé des liens étroits avec les établissements d'enseignement supérieur français : en liaison avec des universités françaises et des écoles d'ingénieurs, il organise des enseignements qui débouchent sur des diplômes de troisième cycle : diplôme d'études supérieures spécialisées (DESS) et diplôme d'études approfondies (DEA). Ces programmes sont ouverts aux titulaires de la maîtrise (diplôme qui correspond sensiblement au « Bachelor's degree ») et durent une année universitaire. La plupart des diplômés de troisième cycle s'inscrivent à un doctorat dans des domaines de recherche avancés au CEA, à l'université ou au CNRS.

Réforme LMD (Licence, Master, Doctorat)

Une réforme du système universitaire français est en cours, principalement pour le rendre cohérent avec le système en usage dans le reste de l'Europe : licence (trois ans), master (+ 2 ans), doctorat (+ 3 ans). Cette réforme sera mise à profit pour créer un petit nombre d'enseignements en master bien ciblés et proposant un programme nucléaire dense. Les principaux enseignements auront pour thème la chimie nucléaire, les matières nucléaires, la simulation et la modélisation, et la physique des réacteurs de fission et de fusion.

Enseignement international

L'ouverture du système éducatif français à l'enseignement international, qu'il s'agisse de permettre à des étudiants français d'effectuer une partie de leurs études à l'étranger ou d'attirer des étudiants étrangers en France, constitue un autre défi. C'est pour le relever que le CEA participe au programme européen d'enseignement des sciences nucléaires ENEN. La participation du CEA aux réseaux d'excellence européens (ACTINET, par exemple) peut aussi contribuer à atteindre cet objectif.

Chaque année, une centaine d'étudiants étrangers s'inscrivent à des cours proposés par l'INSTN. Ils sont admis dans les mêmes conditions que les étudiants français dès lors qu'ils disposent d'une formation de base suffisante (attestée par une équivalence de diplôme ou vérifiée par un examen d'entrée) et qu'ils maîtrisent correctement la langue française.

Le CEA organise aussi des cours d'été dans le domaine de l'énergie nucléaire. C'est ainsi, par exemple, qu'il a créé en 1995 l'école d'été Frédéric Joliot et Otto Hahn pour promouvoir les connaissances dans le domaine de la physique des réacteurs au sens large et l'échange international d'enseignants, de jeunes scientifiques et de chercheurs. Ces cours sont organisés actuellement par le centre de recherche de Karlsruhe et par la Direction de l'énergie nucléaire du CEA (CEA/DEN).

Parallèlement, l'INSTN organise également, à la demande de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), une formation continue spécifique (d'une durée de quelques jours à quelques semaines) à l'intention d'experts de haut niveau venant de pays en développement. Actuellement, ces cours, qui sont donnés en français ou en anglais, portent notamment sur les sujets suivants : sûreté nucléaire, radioprotection, protection contre les rayonnements en radiologie diagnostique et interventionnelle.

L'INSTN aide aussi les commissariats à l'énergie atomique et les organismes de recherche étrangers en leur prodiguant des conseils sur la façon de mettre en place leur propre système de formation dans les techniques nucléaires. Enfin, l'INSTN peut aussi aider des pays étrangers à élaborer des programmes de formation adaptés au rythme de développement de leur programme nucléaire et à leur système éducatif.

Le CEA conduit aussi une politique bilatérale d'échanges d'étudiants (doctorants et post-doctorants) avec quelques instituts de recherche étrangers sélectionnés.

La permanence des efforts d'éducation et de formation déployés en France dans le domaine nucléaire pourrait se révéler payante à moyen terme. L'exhaustivité et la diversité des programmes d'enseignement proposés pourraient séduire les étudiants étrangers si l'activité nucléaire redémarre en Europe. Un effort d'adaptation reste cependant nécessaire dans la mesure où la plupart des cours sont donnés en français. En outre, le système éducatif français est pénalisé par les petites dimensions et la fragmentation de ses structures d'enseignement, ce qui nuit à sa visibilité. La création récente de

fédérations regroupant des établissements d'enseignement, à l'exemple de la Fédération Gay-Lussac dans le domaine de la chimie et du génie chimique, ou la participation d'établissements d'enseignement français (universités et écoles d'ingénieurs) à des réseaux tels que le réseau UniTech devrait contribuer à améliorer la situation.

Éducation et formation par la recherche

Le CEA dans son ensemble a une mission d'éducation et de formation par la recherche. La thèse est son principal vecteur pour remplir cette mission. Le CEA accueille environ 300 nouveaux doctorants par an dans ses laboratoires, dont 45 spécialisés dans le domaine de l'énergie nucléaire. Ces 45 étudiants choisis après une sélection rigoureuse bénéficient d'une bourse doctorale. Le CEA octroie 30 bourses par an et les autres sont financées ou cofinancées par l'industrie et les régions. D'autres organismes comme le CNRS, l'ANDRA et l'IRSN accueillent aussi un nombre significatif, bien qu'inférieur, de doctorants dans le domaine nucléaire.

Pour la recherche nucléaire, il est vital d'attirer des chercheurs de haut niveau. Or, en raison des conditions médiocres offertes aux chercheurs en France, on constate un flux très préoccupant d'émigration de jeunes chercheurs français. Le domaine nucléaire échappe à cette tendance générale. La participation croissante de la France à des programmes de recherche internationaux ambitieux (GenIV, ITER, etc.) contribue probablement à maintenir l'attrait de la France comme pôle de recherche nucléaire.

Rôle des sociétés savantes

La société française d'énergie nucléaire (SFEN) et la société française de radioprotection (SFRP) sont deux sociétés savantes puissantes et dynamiques qui jouent un rôle positif dans l'éducation et la formation. Toutes deux proposent des cours de bon niveau, organisent des séminaires et des conférences, et encouragent la création de réseaux. Ces sociétés se caractérisent par la participation très active de spécialistes retraités qui contribuent efficacement à transmettre les connaissances entre les générations.

Sessions de formation (formation professionnelle continue)

Ces sessions correspondent à des programmes de formation courte (de quelques jours à quelques semaines, principalement en langue française) conçus pour des ingénieurs, des chercheurs ou des techniciens qualifiés. Elles visent deux objectifs : la mise à jour des connaissances pour ceux qui disposent déjà d'une formation solide dans la discipline et une initiation pour ceux qui sont spécialisés dans d'autres domaines.

En 2002, l'INSTN a accueilli environ 7200 spécialistes dans différents domaines : centrales nucléaires, matières nucléaires, cycle du combustible nucléaire, environnement, radioprotection, sûreté nucléaire et non nucléaire, radio-isotopes utilisés en biologie, biologie moléculaire, chimie, radiochimie, analyse chimique, radioactivité, mesures nucléaires, gestion de projet et d'autres thèmes encore, dont une « formation nucléaire de base », programme de onze semaines destiné à donner à de jeunes spécialistes une vue d'ensemble de l'énergie nucléaire. De nouvelles sessions de formation spécialisées sont en projet.

Autres aspects du renforcement des compétences

Gestion des connaissances

Comme partout ailleurs, les experts français prennent généralement la retraite sans avoir transmis toutes leurs connaissances à leurs successeurs. La transmission des connaissances est pourtant jugée cruciale dans le domaine nucléaire qui combine des connaissances très spécialisées et de longues constantes de temps. Il n'y pas de politique générale au niveau national pour remédier à ce problème, mais AREVA et le CEA ont entrepris de capitaliser le savoir des experts dans les domaines où des spécialistes de premier plan vont prendre leur retraite prochainement sans être probablement remplacés à court terme.

Système d'information scientifique et technique – Bases de données

Le CEA est en train de réorganiser son système d'information scientifique et technique. Il s'agit principalement de le simplifier en unifiant les bases de données et en adoptant un outil unique de gestion des données électroniques qui servira à exploiter ces bases.

La France participe aussi à la mise en œuvre de bases de données scientifiques internationales sous les auspices de programmes européens ou de l'OCDE. Le CEA contribue financièrement aux bases de données nucléaires internationales ISIS et ETDE mais il a décidé en 2004 de limiter son soutien à la première dans l'avenir.

De façon plus générale, l'adoption de la norme de qualité ISO 9000 par la plupart des acteurs du nucléaire incitera à rationaliser la gestion des connaissances et le renforcement des compétences.

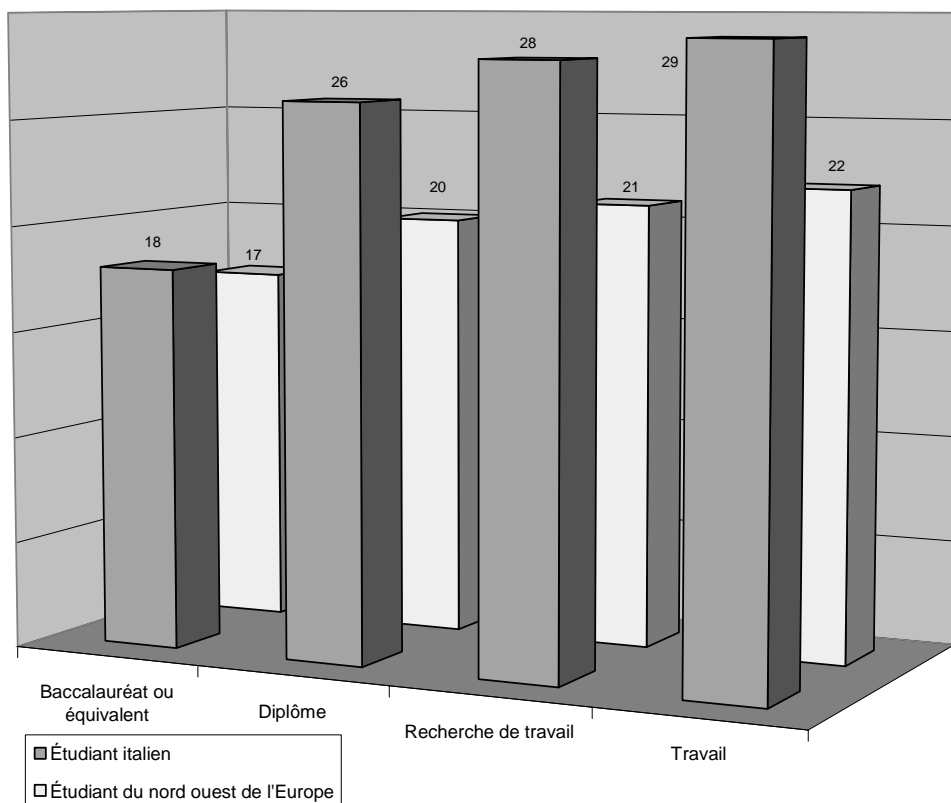
Italie

Information de base sur l'enseignement

Comme l'indique le rapport : *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*, publié par l'AEN en 2000, l'Italie compte 45 universités d'État, trois écoles polytechniques, six universités privées, trois instituts d'État, six instituts privés, deux universités pour étudiants étrangers et trois établissements pour études avancées. Jusqu'à l'an passé, la situation est restée inchangée par rapport à la description donnée dans le précédent rapport de l'AEN. En résumé, les universités et les organisations équivalentes, octroyaient trois niveaux de diplômes différents aux étudiants qui achevaient avec succès leurs programmes de cours. Le premier destiné aux étudiants de premier cycle était le baccalauréat (*diploma*) qui était décerné après l'achèvement d'un programme d'une durée de deux à trois ans. Le diplôme de second cycle, un Master (*laurea*) était octroyé aux étudiants après achèvement d'un programme d'une durée de quatre à six ans et suivi par la préparation et la soutenance d'un mémoire de fin d'études. Enfin, le diplôme de troisième cycle ou Docteur (*dottorato* ou *specializzazione*) était délivré aux étudiants titulaires d'un Master après achèvement d'un programme d'une durée au moins égale à trois ans comprenant une recherche scientifique et la soutenance d'une thèse de fin d'étude. Si l'on examine le graphique ci-dessous en gardant à l'esprit ces explications, on peut constater l'importante différence en termes d'années de formation qui sépare un étudiant italien d'un autre étudiant européen équivalent. Faute d'une sanction officielle à l'issue des trois premières années, il fallait à tous les étudiants italiens de quatre à six ans pour obtenir un premier diplôme. En outre, comme le montre le graphique ci-dessous, la situation était encore aggravée par l'année supplémentaire « perdue » pendant le cycle secondaire.

À compter de l'année universitaire 2002-2003, un nouveau système a été mis en place dans l'ensemble des universités italiennes. Dans l'ensemble, le système est désormais plus convivial pour l'étudiant. Il l'aide à mieux gérer le temps qu'il consacre à ses études, en lui permettant d'entrer dans le marché du travail à 22-23 ans, au lieu de 28.

Le nouveau système d'études s'articule désormais autour de deux cycles consécutifs : la *Laurea triennale* et la *Laurea specialistica*. Après avoir terminé le cycle de spécialisation, un étudiant peut poursuivre ses études en suivant un enseignement menant à un Master (de premier ou de second niveau).



La *Laurea triennale* est subordonnée à l'obtention de 180 CFU (*Credit Formativi Universitari*), c'est-à-dire crédits de formation universitaire) et à la réussite d'un examen de langue portant sur une langue européenne. Ce premier diplôme peut donc être obtenu à l'âge de 22 ans, ce qui permet aux jeunes d'entrer sur le marché du travail au même âge que leurs collègues européens. Si un étudiant souhaite poursuivre ses études, il peut s'inscrire à une *Laurea specialistica* ou à un Master de premier niveau.

La *Laurea specialistica* s'obtient après l'acquisition de 300 CFU (180 au titre de la *Laurea triennale* plus 120 supplémentaires). C'est la règle dans la plupart des situations, mais pas dans toutes. Si un étudiant titulaire d'une *Laurea triennale* en mathématiques souhaite obtenir une *Laurea specialistica* en physique, il ne peut valider qu'une partie de ses 180 CFU.

Le Master de premier niveau est accessible en un an après une *Laurea triennale* et représente une forme de spécialisation dans un domaine plus limité que celle proposée dans une *Laurea specialistica*. Il est possible de s'inscrire pour un Master de premier niveau immédiatement après l'obtention de la

Laurea triennale, mais les crédits accumulés pendant le premier cycle d'étude sont acquis définitivement ; il est possible de s'inscrire à un Master de premier niveau après une interruption de quelques années.

Pour compliquer légèrement la situation, il existe également une *Laurea triennale* à cycle unique. En réalité, cette complication n'est qu'apparente, car elle ne concerne qu'un petit nombre de diplômes : pharmacie, études dentaires et vétérinaires (d'une durée de cinq ans) et études médicales (d'une durée de six ans). Dans ces disciplines, aucun diplôme n'est envisagé à l'issue des trois premières années, mais uniquement à l'issue d'un cycle de cinq ans. S'agissant de la médecine, il y a encore des spécialisations différentes post-doctorales (pédiatrie, cardiologie, etc.).

Les étudiants qui ont obtenu une *Laurea specialistica* peuvent suivre un enseignement de Master de second niveau qui permet d'approfondir les connaissances acquises pendant les cycles d'études précédents. Quant aux étudiants qui souhaitent se consacrer à la recherche scientifique, ils peuvent entamer un doctorat juste après l'obtention de la *Laurea specialistica*.

Peut-être n'est-il pas inutile de rajouter quelques mots pour préciser la notion de CFU. On a calculé qu'un étudiant peut consacrer 1 500 heures de son propre temps dans une année pour étudier, assister aux cours, se rendre au laboratoire et faire un stage. Un capital de 1 500 heures correspondent à 60 CFU, autrement dit, une unité de crédit est égale à 25 heures. Près de la moitié des CFU sont consacrés à l'étude individuelle et leur obtention est liée à la réussite aux différents examens. Les CFU mesurent le travail nécessaire pour atteindre des objectifs spécifiques. Les examens sont notés sur une échelle de 30 points et l'épreuve finale avant le diplôme est noté sur 110. La *Laurea triennale* est sanctionnée par un examen final alors que la *Laurea specialistica* prévoit la soutenance d'un mémoire de fin d'études. Pour conclure, on peut dire que les CFU mesurent le degré de réalisation de l'objectif éducatif tandis que les notes représentent le niveau de connaissances atteint.

Situation de l'énergie nucléaire

L'Italie demeure sous le coup d'un moratoire. C'est la conséquence des réponses à un référendum tenu en novembre 1987 sur un certain nombre de sujets spécifiques concernant l'énergie nucléaire. À la suite de cette consultation, le gouvernement italien a ordonné l'arrêt de toutes les centrales électronucléaires en exploitation en Italie, de la construction de nouvelles centrales et de la conception de nouveaux modèles de centrales. De nombreux étudiants ont demandé à changer d'orientation. Les six universités enseignant des disciplines nucléaires ont modifié leurs programmes pour se rendre moins dépendantes de l'énergie nucléaire, même si quelques examens ont été maintenus dans cette matière. L'université de Pise, par exemple, propose un programme sur la technologie industrielle et le génie en sûreté nucléaire. Malgré la situation critique décrite ci-dessus, les universités, les centres de recherche et certains secteurs industriels « nucléaires » ont fait et continuent de faire des efforts pour capter l'attention des jeunes générations. Toutes les universités ont maintenant leur propre site Internet. Elles donnent souvent des détails au sujet de leurs cours au moyen de pages Web ou d'autres vecteurs de communication. Elles organisent des séminaires destinés à expliquer le contenu des cours liés à l'énergie nucléaire. Pour optimiser leurs moyens de recherche, les six universités nucléaires ont créé en 1994 le Consortium interuniversitaire pour la recherche en technologie nucléaire (CIRTEN). Le CIRTEN est une organisation indépendante qui intervient dans la réalisation, la promotion et le développement d'activités de recherche, de cours de formation et de campagnes d'information dans le domaine nucléaire. Elle demeure active malgré une la situation qui se dégrade au fil des années.

L'industrie nucléaire est fortement pénalisée par le moratoire. ANSALDO, par exemple, le principal fabricant nucléaire italien, travaille principalement à l'étranger dans des coentreprises avec des groupes internationaux tels que l'EACL (Canada) et Westinghouse (États-Unis).

Les nouveaux recrutements à ANSALDO NUCLEARE dépendent beaucoup de deux facteurs : a) le nombre de départs à la retraite par rapport aux effectifs ; et b) la disponibilité de fonds suffisants provenant de contrats nationaux et internationaux dans le domaine spécifique où seront affectés les nouveaux diplômés. Récemment, ANSALDO NUCLEARE s'est fortement investi dans la construction de certaines parties de la première tranche de la centrale nucléaire de Cernavodã en Roumanie. L'ENEL, l'Office italien de l'électricité, a modifié sa politique énergétique pour « arrêter les centrales nucléaires et aller de l'avant avec les centrales au pétrole, au gaz et à combustibles multiples », de telle sorte que l'Italie est de plus en plus tributaire du pétrole. Récemment, l'ENEL a préparé, en collaboration avec l'université de Tuscia, une exposition afin de montrer le travail réalisé pour restaurer l'environnement du site de Montalto di Castro, où était implantée une centrale nucléaire. L'ENEA, le centre de recherche italien le plus important dans le domaine énergétique, continue de réduire ses effectifs en encourageant les départs à la retraite sans les compenser par de nouveaux recrutements.

Le 29 janvier 1999, le Conseil des ministres italien a approuvé un décret relatif à la restructuration de l'ENEA, dans le cadre d'une réforme plus vaste, visant à réorganiser les institutions de recherche nationale subventionnées par l'État. Dans le but de remotiver l'organisation, le décret a confié à l'ENEA une mission nouvelle mieux définie qui reflète les défis que doit relever l'Italie dans le monde d'aujourd'hui et dessine un cadre réglementaire visant à rationaliser et à dynamiser les activités de l'organisation. Dans ce nouveau cadre réglementaire, l'ENEA se présente comme une entreprise publique travaillant dans les domaines de la recherche et de l'innovation en vue de promouvoir des solutions destinées à favoriser le développement, la compétitivité et l'emploi, tout en préservant l'environnement. Malheureusement, la situation n'est pas claire. La prudence dans les nouveaux recrutements et le non remplacement du personnel qui part en retraite dans le secteur reflètent une volonté de tirer un trait sur l'énergie nucléaire en Italie. Mais la recherche ne peut pas être arrêtée ; aussi l'ENEA, dans le cadre des mesures entreprises pour promouvoir la formation de spécialistes et d'experts dans les secteurs qui l'intéressent, a-t-elle proposé 653 thèmes aux étudiants qui préparaient leur mémoire pendant l'année universitaire 2002-2003. Ces mémoires peuvent être achevés avec l'aide d'experts de l'ENEA. Pour pouvoir profiter de cette proposition, les étudiants ne doivent pas avoir plus de quatre autres examens à passer et une note moyenne d'au moins 25 sur 30. Pour l'année universitaire 2002-2003, 23 mémoires de fin d'année avaient trait à l'énergie nucléaire ou à des sujets connexes.

Outre l'ENEA, d'autres organisations participent vigoureusement à des actions de diffusion de la culture scientifique (et nucléaire). Par exemple, l'INFN (Institut national de physique nucléaire) a invité des scientifiques à partager tous les secteurs de connaissances possibles non seulement au sein de la communauté scientifique mais également des établissements scolaires et des universités. À cette fin, l'INFN organise des stages de formation destinés aux jeunes scientifiques, soutient des conférences et des expositions pour illustrer les progrès scientifiques et donne aux étudiants la possibilité de visiter ses laboratoires et d'y rencontrer des scientifiques dans l'exercice de leur travail.

Le CNR (Conseil national de la recherche) est le principal organisme scientifique italien. C'est un organisme public qui joue un rôle de premier plan dans le domaine de la recherche scientifique et technologique du pays et dont la création remonte à 1923.

La fonction première du CNR est de réaliser, par l'intermédiaire de ses propres organes, une recherche fondamentale et appliquée de pointe, à la fois pour développer et maintenir sa propre

compétitivité scientifique et pour se préparer à s'impliquer efficacement et à bon escient dans les domaines stratégiques définis par le système national de planification. Dans le domaine nucléaire, le CNR privilégie essentiellement la physique, la chimie et les sujets connexes tandis que l'énergie nucléaire proprement dite relève directement de l'ENEA. En moyenne, le CNR octroie 10 à 15 subventions chaque année dans le domaine nucléaire.

Il convient à ce stade de dire quelques mots de la situation italienne à la suite du moratoire nucléaire. Beaucoup pensent que le nucléaire a disparu en Italie. L'homme de la rue interprète le moratoire comme une absence totale de nucléaire. C'est absolument erroné et quelque peu hypocrite. Il convient de noter que d'autres pays européens se trouvent aujourd'hui dans une situation analogue. En Italie, le rejet du nucléaire porte sur les applications militaires. C'est un fait. En revanche, l'énergie nucléaire fait l'objet de nombreuses applications pacifiques en Italie. Il suffit de mentionner les applications médicales des matières nucléaires et des rayonnements, les applications industrielles, la recherche industrielle et scientifique. En outre, l'énergie nucléaire est utilisée sous une forme déguisée. Il faut comprendre par là la quantité d'énergie électrique importée des pays voisins par l'Italie. Depuis 1995, une proportion allant de 14 à 18 % de la demande italienne a été satisfaite grâce à l'importation d'électricité nucléaire de pays étrangers, notamment la France. Autrement dit, en décidant d'arrêter ses centrales nucléaires, l'Italie n'a pas renoncé à l'énergie nucléaire, elle l'a simplement transformée en une nouvelle source d'importation. En même temps, le système énergétique italien est tributaire du pétrole à plus de 80 %. Cette réalité implique une lourde responsabilité pour le gouvernement et un risque élevé pour le pays. Un pays fortement industrialisé peut-il être si profondément dépendant du pétrole ? Cette question élémentaire demeure sans réponse. La dépendance à l'égard du pétrole d'origine étrangère a coûté très cher aux consommateurs italiens : environ 28 milliards d'euros en 2000. Nul doute qu'une stratégie d'approvisionnement en énergie plus diversifiée serait préférable.

Japon

En juillet 2001, le sous-comité de l'énergie nucléaire du Comité consultatif des ressources naturelles et de l'énergie a publié un rapport intitulé « Garantir les infrastructures pour la technologie électronucléaire ». Ce rapport développe les idées suivantes.

Les centrales nucléaires sont dorénavant et déjà bien implantées dans le secteur privé. Il existe des bases technologiques solides dans ce domaine. Ces bases technologiques ont été acquises grâce à l'expérience. Dans le domaine du cycle du combustible, les technologies en place qui ont été développées par le gouvernement doivent être transférées progressivement au secteur privé. Dans le domaine des technologies du cycle du combustible qui n'ont pas atteint le stade du développement industriel, il est important d'accumuler des connaissances scientifiques et de la R-D. D'autre part, réduire la R-D pourrait avoir une influence sur la solidité des bases technologiques à long terme.

Le rapport indique aussi que pour garantir les bases technologiques, les conditions suivantes doivent être satisfaites en fonction du degré de maturité de chaque technologie en terme de construction, d'exploitation et d'entretien, de production de combustible, de retraitement de combustible irradié et de gestion et d'évacuation des déchets :

1. Promotion de la R-D pour l'amélioration des technologies innovantes et l'application des réglementations.
2. Promotion de la R-D pour démontrer la faisabilité des technologies innovantes.

3. Existence de capacités de conception et de fabrication des technologies innovantes dans l'industrie.
4. Flux important de personnel pour prendre en charge ces recherches, la réglementation, le développement, la production et l'utilisation des technologies.
5. Disponibilité permanente d'installations de recherche en bon état.
6. Les conditions ci-dessus sont satisfaites grâce à la communication interne et les liens entre personnes et organisations.

Le 17 mars 2003, le Conseil des sciences du Japon a publié un rapport sur l'enseignement et les ressources humaines pour l'énergie atomique intitulé « Reconstruction de la science de l'énergie atomique pour l'harmonisation de la société ». Dans ce rapport, le Conseil exprime le point de vue suivant : « la science de l'énergie atomique traverse une crise dans les domaines de la recherche, de l'enseignement et de la formation des ressources humaines en raison de la stagnation de l'utilisation de cette source d'énergie, de la recherche et du développement dans le secteur et de la décroissance du nombre d'étudiants qui s'inscrivent à des cours sur ce sujet. » Le Conseil recommandait que « les chercheurs et les techniciens dans le domaine de la science de l'énergie atomique aient un sens une déontologie, réaffirment que ce champ d'études joue un rôle important dans la société et coopèrent étroitement avec des experts dans différentes disciplines y compris les sciences humaines et sociales. »

Quant aux mesures destinées à assurer l'excellence des ressources humaines, le rapport indique que « l'enseignement et la formation dans les domaines des sciences de l'énergie atomique doivent être remaniés dans un cadre très large. » Le Conseil recommandait que « pour répondre aux demandes du secteur industriel concernant l'accès à la technologie utilisée dans les installations nucléaires en service, une nouvelle organisation d'enseignement, comme par exemple un cours de technologie nucléaire enseigné dans plusieurs universités, soit créée. Il indiquait également qu'il serait bon de mettre en place un centre d'enseignement et de recherche sur les sciences de l'énergie atomique dans les universités des régions où l'utilisation de l'énergie atomique est susceptible de se développer. » En outre, en ce qui concerne la création d'une nouvelle entité administrative indépendante par la fusion de l'Institut de recherche sur l'énergie atomique du Japon (JAERI) et de l'Institut de développement du cycle du nucléaire du Japon (JNC), actuellement en cours, le Conseil stipulait que « la nouvelle entité administrative indépendante doit coopérer plus activement avec les universités non seulement dans le domaine de la recherche mais aussi dans ceux de l'enseignement et de la formation de personnel dans le domaine nucléaire. »

Il est vraisemblable que les centrales nucléaires qui fournissent déjà plus d'un tiers de l'électricité produite au Japon continuent à approvisionner une part importante de la consommation du Japon à long terme. Cependant, le programme de conversion des universités nationales en organisations administratives indépendantes pourrait entraîner une situation difficile dans l'enseignement du génie nucléaire et une diminution du nombre d'installations de grande taille dédiées à l'enseignement. (Par exemple, le réacteur de recherche de l'université de Kyoto sera fermé en 2006.)

Compte tenu de ces nouvelles tendances, on espère que les difficultés seront surmontées grâce à des mesures telles que la création d'un centre de formation des opérateurs de réacteurs à eau bouillante financé par l'industrie, y compris les compagnies d'électricité, afin de garantir la formation de ressources humaines hautement qualifiées pour l'industrie nucléaire. Simultanément, comme on peut s'en rendre compte au travers de l'évolution vers une dissémination de l'information sur Internet, afin de restaurer la confiance du public, le milieu de l'énergie atomique au Japon doit devenir plus transparent et davantage d'efforts doivent être faits pour une large acceptation par le public de la sûreté nucléaire.

Le 17 janvier 2003, le Forum industriel atomique du Japon (JAIF) a publié un rapport sur la situation actuelle de l'énergie nucléaire intitulé « Comment restaurer l'énergie nucléaire au Japon ». Ce rapport donne l'évolution des effectifs de l'industrie nucléaire privée. Ces effectifs ont baissé de 5 % entre l'année fiscale 2000 et l'année fiscale 2001. Ils n'ont pas cessé de diminuer depuis l'année fiscale 1999 et sont maintenant au même niveau que pendant l'année fiscale 1979. En particulier dans le domaine des fabricants de centrales, on peut prévoir que le nombre total d'employés diminue tandis que certains départements augmentent. Ceci est dû à une meilleure productivité résultant de la rationalisation du travail grâce au recours à l'informatique dans la conception et la construction sur site.

Après une période de construction de nouvelles centrales, d'après le rapport, la Japon est maintenant dans une phase d'exploitation et d'entretien des centrales existantes. Le Japon a aussi besoin de personnel travaillant sur la nouvelle génération technologique. Le Japon doit déterminer le nombre minimum de techniciens nécessaire pour maintenir les technologies et conserver la qualité technologique par l'enseignement et la formation.

Dans le contexte national et international actuel, et compte tenu de la nécessité de systèmes nucléaires innovants et l'attente de la société quant à ces systèmes, la Commission de l'énergie atomique (AEC) a conduit des enquêtes et des discussions dans le cadre d'un Sous-comité sur les réacteurs innovants et les technologies du cycle du combustible associées sous l'égide du Comité consultatif sur la R-D. Ce Sous-comité a délibéré pendant 11 mois en 2001 et a publié un rapport intitulé « Moyens de promouvoir la R-D dans le domaine des systèmes nucléaires innovants du futur ». Dans une première étape pour aborder la R-D sur les systèmes nucléaire innovants, le rapport décrit la situation actuelle de la R-D au Japon et résume les concepts de base sur lesquels s'appuient ces systèmes ainsi que les stratégies pour leur développement.

Le ministère de l'Éducation, de la Culture, des Sports, de la Science et de la Technologie (MEXT) et le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI) soutiennent financièrement des programmes concurrentiels de promotion de recherche et développement en matière de technologie de l'énergie nucléaire, chacun sous l'angle qui lui est propre.

Le MEXT a mis en place un nouveau dispositif pour les activités de recherche et développement sur technologies nucléaires innovantes en créant un contexte concurrentiel par des appels publics à projets dans le domaine. Dans ce cadre concurrentiel, le dispositif vise à renforcer la coopération entre le secteur industriel, le secteur universitaire et le secteur public pour la conduite de recherche fondamentale sur l'énergie nucléaire, le développement technologique et l'essai des technologies nucléaires innovantes susceptibles d'élargir le champ d'application de l'énergie nucléaire.

Simultanément, le METI soutien la poursuite des projets de développement des technologies nucléaires innovantes viables et l'accélération de l'industrialisation des technologies de réacteur et de cycle du combustible, cherchant par là à améliorer la sûreté et les performances économiques de l'énergie nucléaire.

Une décision du Cabinet sur un plan de réforme et de rationalisation des entreprises publiques spéciales a été prise en décembre 2001. En application de cette décision, le JAERI et le JNC fusionneront et une nouvelle agence administrative indépendante chargée de la recherche et du développement intégrés de l'énergie atomique sera créée. La Commission de l'énergie atomique a présenté les grandes orientations pour l'unification du JAERI et du JNC préalablement à l'examen de la question par les organismes administratifs compétents. Au sein du MEXT, le Comité préparatoire pour l'unification des deux entités nucléaires examine le rôle et les fonctions de la nouvelle agence en tenant compte des priorités et de l'efficacité de mise en œuvre.

Royaume-Uni

Contexte

Il y a actuellement, au Royaume-Uni, 14 centrales nucléaires en exploitation qui produisent environ 23 % de l'électricité du pays. Six de ces centrales sont de type Magnox et doivent être mises hors service d'ici à 2010, sept sont de type AGR et doivent être fermées d'ici à 2023 et la dernière est de type REP et doit être mise hors service d'ici à 2035.

Le gouvernement du Royaume-Uni a pour politique de transférer l'exploitation des centrales nucléaires du secteur public au secteur privé. C'est pourquoi les centrales AGR et REP sont exploitées par British Energy, entreprise totalement privatisée, et les centrales Magnox par la BNFL Magnox, société publique à responsabilité limitée. Le gouvernement a récemment énoncé sa politique énergétique dans un Livre blanc (<http://www.dti.gov.uk/energy/whitepaper/ourenergyfuture.pdf>) et, il n'y a actuellement aucune proposition de construire de nouvelles centrales nucléaires pour remplacer celles qui vont être mises hors service. Cette éventualité n'a pas été écartée, mais la décision incomberait au secteur commercial et devrait respecter les critères des investisseurs privés.

Il est probable que dans les années à venir, la décontamination aura priorité sur la construction de nouvelles centrales. Le Royaume-Uni est confronté à un sérieux problème de restauration de l'environnement découlant de son ancien programme d'armement nucléaire, de la gestion du combustible irradié et du démantèlement des centrales nucléaires. Les plans du gouvernement pour relever ce défi sont exposés dans le Livre blanc *Managing the Nuclear Legacy* (<http://www.dti.gov.uk/nuclearcleanup/>). L'une des principales mesures prévues est la création d'une nouvelle agence non gouvernementale, l'Autorité du démantèlement nucléaire (*Nuclear Decommissioning Authority – NDA*). La NDA, qui devrait voir le jour en avril 2005, sera responsable des installations anciennes du Royaume-Uni et aura les qualifications et les moyens requis pour superviser la gestion stratégique et la direction de la décontamination de ces installations.

Industrie

Compte tenu de l'incertitude qui pèse sur l'avenir de l'électronucléaire au Royaume-Uni, le recrutement dans l'industrie nucléaire est devenu de plus en plus problématique. Cette situation est aggravée par la désaffection persistante des étudiants pour la science, l'ingénierie et les matières technologiques où le nombre des inscriptions a baissé dans des proportions sensibles au cours des dernières années. Les diplômés de grande valeur dans les disciplines techniques se faisant toujours plus rares, ils sont de plus en plus recherchés et l'industrie nucléaire a déjà commencé à en pâtir. Le pourcentage de diplômés scientifiques dont les cours contenaient un volet nucléaire minimum demeure désespérément bas.

La planification de la relève est de règle, au moins dans les grandes entreprises, et les problèmes de la relève à moyen terme sont souvent l'élément déterminant du recrutement. C'est pourquoi, les offres d'emploi ciblent des domaines spécifiques. Les entreprises non seulement utilisent les moyens classiques tels que les revues spécialisées et les médias locaux et nationaux, mais elles publient aussi des vacances d'emploi sur leur site Web et proposent un recrutement en ligne. Elles ont également recours à des agences spécialisées ou à des entreprises de recrutement, surtout lorsqu'elles cherchent à attirer des candidats hors des frontières nationales.

Les entreprises proposent des plans d'évolution de carrière à leurs nouvelles recrues, une aide au perfectionnement professionnel et des programmes de formation approfondis. Les salaires et les indemnités d'emménagement sont souvent négociables pour attirer le personnel dans des domaines de qualification stratégiques.

Les recrutements peuvent également se faire par des contacts directs avec les universités. Dans le cadre de salons de l'emploi et du recrutement, mais aussi très souvent par le biais de contrats de recherche ou d'une aide à des cours dans le domaine nucléaire.

Lorsque le secteur énergétique a été libéralisé, la recherche a également été déréglementée de fait et il n'existe plus d'institut de recherche nucléaire au Royaume-Uni. La déréglementation a également marqué la fin du financement public de la R-D nucléaire et il incombe aux entreprises individuelles de formuler et de financer leurs propres programmes de R-D.

À la suite de l'achèvement de Sizewell B en 1995, le niveau de la recherche en faveur des systèmes de réacteurs innovants a considérablement baissé. Depuis plusieurs années maintenant, la R-D financée par les producteurs nucléaires du Royaume-Uni se limite essentiellement à des programmes visant les systèmes exploités par l'entreprise et le soutien opérationnel ainsi qu'à un programme de recherche en collaboration sur la sûreté nucléaire entrepris en réaction aux questions réglementaires soulevées par la Direction de la santé et de la sécurité (*Health and Safety Executive – HSE*). Outre ce programme en collaboration, la HSE commande séparément des recherches sur la sûreté des réacteurs, qui sont financées par les exploitants grâce à une redevance qu'elle préleve par la HSE. Ces programmes visent tous des réacteurs en exploitation. En dehors du REP de Sizewell B, ces réacteurs appartiennent à l'un des deux types de filières graphite-gaz propres au Royaume-Uni.

La BNFL continue de mener des travaux de recherche et de développement en interne au sujet du cycle du combustible, du démantèlement et de la gestion des déchets, qui sont presque entièrement axés sur les besoins des centrales existantes.

Les producteurs d'électricité nucléaire du Royaume-Uni sont partis à plusieurs projets relevant du Programme-cadre européen et du Programme du réacteur de Halden. Le Royaume-Uni participe également au Forum Génération IV pour partager ses compétences et étayer ses réflexions concernant ses orientations actuelles et futures.

Universités

Le financement des enseignements de premier et deuxième cycles se fait sous la forme d'une dotation globale versée par l'intermédiaire d'agences gouvernementales ; le financement est proportionnel au nombre d'étudiants inscrits. Toute place vide entraînant une baisse du financement, les universités ne peuvent littéralement pas se permettre de maintenir des cours qui n'attirent qu'une poignée d'étudiants. L'industrie nucléaire a vu ses effectifs diminuer, et partant son recrutement, au fur et à mesure qu'elle passait du stade d'une industrie émergente en expansion à celui d'une industrie éprouvée et qu'elle cherchait à accroître sa compétitivité dans un secteur énergétique libéralisé. Les étudiants ont donc déserté les cours nucléaires qui ont été remplacés par des cours en rapport avec d'autres industries pour lesquelles une demande existe.

Une enquête sur les disciplines nucléaires enseignées dans les universités britanniques en 2002 a montré que bien que des modules nucléaires de premier cycle soient actuellement au programme dans 22 des 130 universités du Royaume-Uni, ils ne représentent généralement que 5 % du contenu du diplôme (<http://www.hse.gov.uk/nsd/nuceduc.htm>). Il n'existe plus aujourd'hui de cours de premier cycle ayant un contenu nucléaire significatif et l'enseignement nucléaire à ce niveau a été ramené à des cours d'initiation noyés dans les diplômes scientifiques dominants.

Dans plusieurs universités, une sensibilisation aux recherches menées dans le secteur nucléaire, grâce à la conclusion d'accords de recherche entre l'industrie et l'université, a aiguisé l'intérêt parmi

les étudiants de premier et second cycles, d'où une augmentation dans le nombre des cours ainsi que la création de nouveaux modules. Entre 2000 et 2002, les effectifs d'étudiants des premier et deuxième cycles ayant suivi des modules nucléaires est passé de 1 300 à 1 450, essentiellement pour cette raison.

Au niveau du troisième cycle, le gouvernement accorde quelques crédits par le biais des Conseils de recherche pour soutenir des cours de maîtrise, mais ce financement est limité et la plupart des cours sont financés par l'industrie. Compte tenu de cette situation de l'offre et de la demande, certaines universités ont pris des dispositions pour préserver leur enseignement dans le domaine nucléaire et d'autres pour offrir de nouveaux enseignements. Il s'agit dans tous les cas de proposer des cours souples et modulaires qui séduisent les étudiants tout en répondant aux besoins des employeurs.

Un cours traitant de la physique et de la technologie des réacteurs nucléaires inscrit depuis longtemps au programme a été préservé, malgré le retrait du financement par le Conseil de la recherche, grâce à un accord de partenariat passé entre l'autorité de sûreté, l'université concernée et dix entreprises. À l'issue de discussions avec l'industrie nucléaire pour identifier les besoins, la même université a créé un certificat de troisième cycle en gestion des déchets radioactifs et en démantèlement.

Après de longues négociations avec plusieurs entreprises, une autre université a organisé un cours de maîtrise en génie de la sûreté comprenant un noyau de modules génériques, complété par des modules de spécialisation facultatifs. En balayant large, on augmente les chances de survie du cours et sa structure continue malgré tout de garantir un contenu nucléaire non négligeable pour les étudiants qui choisissent cette option.

Dans une troisième université, la physique médicale a attiré beaucoup d'étudiants et l'enseignement nucléaire prend de plus en plus de place chaque année en raison de la priorité croissante accordée à l'innovation en radiothérapie et en médecine nucléaire, en réponse à la directive gouvernementale de lutte contre le cancer. Outre un corps de scientifiques possédant une bonne connaissance des principes nucléaires, cet enseignement présente pour l'industrie nucléaire l'avantage direct de former des spécialistes en radioprotection.

Un établissement militaire spécialisé dans la formation nucléaire est désormais accessible aux civils et au moins une entreprise nucléaire a un accord de partenariat concernant aussi bien la formation que le recrutement. Un certain nombre de cours de troisième cycle sont disponibles, ratifiés par une université locale, et d'autres en voie d'élaboration pour répondre à la demande. En deçà de ce niveau, il existe un large éventail de cours de formation dans des domaines intéressant l'industrie civile ainsi que dans d'autres à vocation strictement militaire. Cet assouplissement des frontières entre les secteurs militaire et civil est bénéfique pour l'industrie nucléaire en général.

Entre 2000 et 2002, le nombre total d'étudiants qui suivaient des cours de troisième cycle ayant un contenu nucléaire supérieur à 5 % est resté stable à environ 165 par an. Cependant, si l'on ne prend en compte que les programmes à 100% nucléaires, alors le nombre d'étudiants est tombé de 56 à 43 par an.

L'ensemble des recherches universitaires financées par le gouvernement est géré par les Conseils de recherche. La recherche nucléaire jouit d'une faible priorité. En 2002, le Conseil de la recherche en ingénierie et en sciences physiques avait bénéficié d'une enveloppe de plus de 400 millions de livres sterling pour l'aide à la recherche et à la formation d'étudiants de troisième cycle : pour sa part, l'énergie nucléaire avait reçu 0,8 million de GBP et la recherche sur les énergies renouvelables 15 millions.

Les entreprises nucléaires du Royaume-Uni financent des projets de R-D dans les universités. En 2000, l'industrie nucléaire avait plus de 250 contrats avec plus de 50 universités britanniques, pour un montant d'environ 10 millions de GBP par an. Jusqu'à présent, de nombreux contrats étaient conclus sur une base ponctuelle pour répondre à des besoins spécifiques à court terme. À l'instar de beaucoup d'autres entreprises, les entreprises du secteur nucléaire groupent désormais des contrats portant sur des domaines thématiques spécifiques dans des universités déterminées pour pouvoir, non seulement gérer plus efficacement leur portefeuille de recherche, mais aussi préserver leurs compétences techniques dans des secteurs essentiels. Comme cela a déjà été noté, la médiatisation croissante de ces accords peut stimuler l'intérêt des étudiants des premier et deuxième cycles pour les disciplines nucléaires.

Les installations de recherche nucléaire varient sensiblement d'une université à l'autre. Il existe quelques laboratoires récents ou rénovés, mais d'autres sont dans leur état d'origine et remontent à plusieurs décennies. Il n'y a plus qu'un réacteur de recherche civil, le réacteur CONSORT de l'Imperial College à Silwood Park, et les deux dernières installations de cellules chaudes dans des universités ont été fermés en 2000.

Pouvoirs publics

Prenant acte de la recommandation formulée dans le rapport de l'OCDE/AEN intitulé *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?* selon laquelle : « les pouvoirs publics devraient contribuer, à défaut d'en assumer la responsabilité, à une planification intégrée visant à garantir la disponibilité des ressources humaines pour faire face aux obligations et traiter les problèmes en suspens », le gouvernement du Royaume-Uni a créé, en septembre 2001, le Nuclear Skills Group (NSG).

Patronné par cinq départements ministériels, et constitué de représentants de ces départements ainsi que d'industriels, d'universitaires et d'un représentant du Young Generation Network (YGN), le NSG a réalisé une étude en deux étapes sur la disponibilité de personnel qualifié et formé pour répondre aux besoins de l'industrie nucléaire au cours des 10 à 15 prochaines années. L'étude a commencé par un audit des qualifications de façon à établir un niveau de référence des besoins actuels de l'industrie et chiffrer la population qualifiée actuellement disponible. Dans un deuxième temps, divers scénarios concernant l'énergie nucléaire seront examinés ainsi que leurs répercussions sur le niveau de référence fixé.

Le domaine de qualifications pris en compte allait au-delà de la simple « production d'électricité » ; il couvrait l'ensemble des entreprises et des organisations qui appliquent des technologies nucléaires et radiologiques, depuis la production d'électricité jusqu'à la santé et à l'environnement en passant par la défense. L'assurance de disposer dans l'avenir de compétences en sûreté nucléaire, aussi bien dans les organisations que dans les autorités de sûreté, était un présupposé tout au long de ce travail.

Le rapport de l'étude, publié en décembre 2002 a été diffusé aux départements ministériels et peut être consulté par le public (<http://www.dti.gov.uk/energy/nuclear/skills/nsg.shtml>). Il conclut que, à l'exception du secteur de la santé où sévit déjà une pénurie de personnel qualifié, la demande de recrutement est satisfaite, mais qu'il devient de plus en plus difficile de trouver des candidats appropriés. On estime au bas mot que, globalement, le secteur devra engager quelque 50 000 nouvelles recrues au cours des 15 prochaines années pour faire face à la demande anticipée. Où le bât blesse, c'est que l'offre doit venir du secteur des sciences de l'ingénieur et des sciences physiques, lequel périclité en raison du peu d'intérêt que suscitent ces disciplines comme sujet d'études universitaires ou choix de carrière.

Devant le constat que, faute de mesures immédiates, une pénurie de qualifications est probable dans les dix années à venir, le rapport formule un certain nombre de recommandations stratégiques et tactiques principalement destinées à l'industrie, bien qu'elles s'adressent aussi aux établissements d'enseignement, aux universités et aux pouvoirs publics. Avant toute chose, le rapport insiste sur la nécessité de créer un organisme privé permanent chargé de prendre en main et de faire avancer la question des qualifications.

Depuis la publication du rapport, les discussions ont conduit à des propositions, qui ont l'appui sans réserve de l'industrie, visant la création d'un tel organisme. Connue sous le nom de Sector Skills Council, il remplacera le NSG et il lui incombera, lorsqu'il sera formé à la fin 2003, de mettre en œuvre les recommandations de l'étude du NSG et d'appliquer le programme relatif aux qualifications. Comme l'atteste le Livre blanc, l'Autorité du démantèlement nucléaire (*Nuclear Decommissioning Authority* – NDA) a des besoins spécifiques en matière de qualifications et, compte tenu de l'accent mis par le Royaume-Uni sur la décontamination, il est probable que les besoins de la NDA influenceront considérablement sur l'évolution des qualifications nucléaires au Royaume-Uni.

QUESTIONNAIRE

1. Contexte

Les objectifs du questionnaire sont les suivants :

1. Déterminer les progrès accomplis au regard des recommandations présentées dans une étude antérieure, *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*¹
2. Quantifier les ressources humaines et recenser les installations dédiées aux diverses disciplines de la R-D nucléaire.
3. Déterminer les mécanismes et les pratiques exemplaires en matière de collaboration internationale dans l'enseignement et la R-D nucléaires.

Alors que les études précédentes de l'OCDE/AEN étaient axées sur l'infrastructure nucléaire dans des domaines d'activité précis, par exemple la sûreté nucléaire, la présente étude, lancée par le Comité du développement nucléaire (NDC), envisage la question des infrastructures d'une manière globale, c'est-à-dire qu'elle balaie la totalité des activités relatives aux applications de l'énergie nucléaire. La présente étude complète une étude précédente intitulée *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*

Le Comité des sciences nucléaires (CSN) a lancé une activité intitulée *Besoins de R-D en sciences nucléaires* à sa réunion de décembre 2001. L'étude récapitule et analyse la R-D passée et présente, et recense les besoins futurs en matière de R-D. Ces besoins ont été examinés dans un atelier qui s'est tenu à Paris les 7 et 8 novembre 2002. Le NDC et le CSN sont convenus que ce dernier se chargerait des objectifs en prenant en compte la documentation rassemblée concernant les besoins de R-D passés, présents et futurs. Il était entendu que le CSN et le NDC coopéreraient sur les questions relatives aux ressources en matière de R-D.

Ces dernières années, le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) et le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR), relevant l'un et l'autre de l'AEN, ont mené une réflexion approfondie sur les moyens d'assurer un niveau de compétences suffisant pour les activités en cours et futures dans le domaine de la sûreté nucléaire. Ainsi, le CANR a décidé récemment de donner une suite à son étude précédente intitulée « Maintenir à l'avenir les compétences en sûreté nucléaire »², visant à déterminer les progrès réalisés au cours des deux à trois dernières années sur cette question. À cette fin, a été envoyé en juillet 2002 un questionnaire qui, dans une certaine mesure, recoupe les mêmes thèmes que les questionnaire ci-dessous (principalement en ce qui concerne la section I). De façon à limiter au minimum les risques de double emploi dans les pays membres, le Secrétariat veillera à ce que les renseignements réunis au moyen des deux questionnaires soient disponibles pour les deux études. **Aussi, si certaines informations ont déjà été transmises pour les besoins de l'étude du CANR, il est inutile de les récrire dans le cadre de la présente étude ou de les soumettre une deuxième fois.**

1. <http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2000/nea2428-education.pdf>

2. <http://www.nea.fr/html/nsd/docs/2000/cnra-r2000-1.pdf>

2. Structure du questionnaire et termes utilisés dans le questionnaire

Le questionnaire se compose de trois parties :

- La section I concerne l'objectif 1 et prolonge l'étude précédente du NDC sur l'enseignement et la formation dans le domaine nucléaire.
- La section II concerne l'objectif 2 et réunit des données sur les ressources et le financement de la R-D nucléaire.
- La section III concerne l'objectif 3 et rassemble des informations sur la collaboration internationale.

Les informations réunies donneront un aperçu des pratiques établies dans les pays membres concernant la collaboration internationale dans les domaines de la R-D et de l'enseignement.

Les termes utilisés dans le présent questionnaire sont définis comme suit :

Période de référence : les données rendent compte de la situation en 2002.

Collaboration multilatérale : activités qui sont réalisées dans le cadre d'organisations internationales telles que l'UE, l'AIEA, l'AEN ou dans le cadre d'accords internationaux faisant intervenir plus de deux organisations.

Collaboration bilatérale : activités qui sont fondées sur un accord entre deux organisations dans des pays différents.

Chercheur : professionnel engagé dans la conception ou la création de connaissances, produits, processus, méthodes et systèmes nouveaux, ainsi que dans la gestion des projets concernés. Les étudiants diplômés du niveau du doctorat sont considérés comme des chercheurs.

Installation importante : installation qui est spécifique à l'industrie nucléaire ou qui constitue une part essentielle de l'infrastructure de la R-D et de l'enseignement.

3. Procédure

Les réponses au questionnaire doivent être fournies sous forme électronique. Les membres du Groupe de travail (ou les membres du Comité de développement nucléaire de l'AEN, pour le cas où le pays ne serait pas représenté dans le groupe) sont aimablement invités à diffuser le questionnaire aux organisations compétentes, et à collecter, examiner et regrouper les questions concernant leur pays. Cette méthode devrait faciliter l'élimination des réponses incohérentes ou redondantes.

4. Calendrier

La date limite pour retourner le questionnaire au Secrétariat par l'intermédiaire des membres du Groupe de travail est fixée au **14 février 2003**. Le Groupe de travail se réunira en avril-mai 2004 pour examiner les données collectées et l'analyse préliminaire préparée par le Secrétariat.

5. Contact

Pour de plus amples informations, veuillez contacter le membre du Groupe d'experts du pays concerné, ou :

M. Timo HAAPALEHTO
Agence de l' OCDE pour l'énergie nucléaire
12, Boulevard des Îles
F-92130 Issy-les-Moulineaux

Tél : 33 1 45 24 10 67
Fax : 33 1 45 24 11 17
EM : timo.haapalehto@oecd.org

Questionnaire
Section I

Enseignement et formation

Les recommandations ci-dessous figurent dans l'étude *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?*

Les pouvoirs publics devraient :

- entreprendre une planification stratégique dans le domaine énergétique, prenant notamment en compte l'enseignement, les ressources humaines et l'infrastructure ;
- contribuer, à défaut d'en assumer la responsabilité, à une planification intégrée visant à garantir la disponibilité des ressources nécessaires pour faire face aux obligations de traiter les problèmes en suspens ;
- apporter, par voie de concours, un soutien aux jeunes étudiants. Ils devraient aussi mettre à disposition des ressources adéquates pour des programmes de recherche et de développement dynamique dans le domaine nucléaire, notamment la modernisation des installations ;
- apporter un soutien par le bien de l'instauration de « réseaux éducateurs » entre les universités, l'industrie et les instituts de recherche.

Les universités devraient :

- offrir des programmes d'enseignement fondamentaux attrayants ;
- dialoguer souvent, et à un stade précoce, avec les populations tant masculines que féminines d'étudiants potentiels, et fournir des informations adéquates.

L'industrie devrait :

- continuer d'offrir des programmes de formation rigoureux pour répondre à ses besoins spécifiques.

Il est nécessaire que les **industries de recherche** mettent sur pied :

- des projets de recherche stimulants pour répondre aux besoins de l'industrie et attirer des étudiants et du personnel de qualité.

L'industrie, les instituts de recherche et les universités ont besoin de travailler de concert afin de :

- mieux coordonner les efforts visant à encourager la jeune génération.

Les pays membres devraient inviter l'AEN

- à concevoir et à promouvoir un programme de coopération entre pays membres dans le domaine de l'enseignement et de la formation nucléaire ;
- à mettre en place un mécanisme permettant de partager des pratiques optimales en vue de promouvoir les enseignements des disciplines nucléaires.

Q I-1 Initiatives des pouvoirs publics

Veillez décrire les initiatives prises récemment (au cours des trois dernières années) par le gouvernement de votre pays pour évaluer les besoins de nouveaux experts, estimer les moyens en matière d'enseignement et de formation ou rendre plus attractif le secteur nucléaire aux yeux des jeunes étudiants. Veuillez décrire brièvement l'objectif et le contenu de ces initiatives.

Q I-2 Initiatives des universités

Veillez décrire les initiatives prises récemment (au cours des trois dernières années) par votre université ou faculté pour rendre le secteur de l'enseignement nucléaire plus attractif. Veuillez décrire brièvement l'objectif et le contenu de ces initiatives.

Q I-3 Initiatives de l'industrie

Veillez décrire les initiatives prises récemment (au cours des trois dernières années) par votre entreprise pour faciliter le recrutement dans le secteur de l'énergie nucléaire. Veuillez décrire dans quelle mesure les considérations sur la planification de la relève ou la gestion des connaissances ont influé sur les initiatives en matière de recrutement.

Q I-4 Initiatives des instituts de recherche

Veillez décrire les initiatives prises récemment (au cours des trois dernières années) par votre institut pour rendre plus attractif le secteur de la recherche nucléaire. Veuillez décrire brièvement l'objectif et le contenu de ces initiatives.

Le cas échéant, veuillez indiquer si et comment l'étude précédente *Enseignement et formation dans le domaine nucléaire : faut-il s'inquiéter ?* a influencé les initiatives susmentionnées.

QUESTIONNAIRE SECTION II

R-D

Q II-1 Programmes et projets de R-D en cours

Veillez donner les renseignements suivants sur les programmes et projets de R-D. Veuillez ajouter une note si les informations communiquées par l'industrie ne sont pas incluses.

Veillez classer les renseignements communiqués selon les disciplines présentées ci-dessous. Si nécessaire, chaque grande discipline peut être subdivisée en thèmes secondaires.

Conception des réacteurs : cette rubrique prend en compte les phénomènes thermo hydrauliques, la physique des réacteurs, les transitoires de réacteurs et l'intégrité de l'équipement et des structures. Les activités relatives à la mise au point de nouveaux réacteurs de puissance et de recherche sont également prises en compte. Des informations sur d'importantes installations de

recherche ont été publiées dans *Sûreté nucléaire – recherche dans les pays de l’OCDE – moyens et installations*, OCDE/AEN 1997 et *Nuclear Safety Research in OECD Countries; Major Facilities and Programmes at Risk*, OCDE/AEN 2001³.

Études sur les matériaux : cette rubrique comprend les activités relatives à la mise au point des matériaux des réacteurs actuels et des matériaux nécessaires pour les nouveaux modèles de réacteurs, par exemple les réacteurs à haute température refroidis par gaz.

Études sur le combustible : cette rubrique comprend les activités relatives aux combustibles des réacteurs actuels et à la mise au point de nouveaux types de combustibles, par exemple pour les réacteurs rapides refroidis par gaz, y compris les combustibles des réacteurs de recherche.

Gestion des déchets : déchets résultant des centrales nucléaires et d’autres installations du cycle du combustible, y compris les réacteurs de recherche. On trouvera des informations sur les installations de recherche dans *Going Underground for Testing, Characterisation and Demonstration (A technical position Paper)*, OCDE/AEN 2001⁴.

Démantèlement : activités concernant les installations du cycle du combustible nucléaire, y compris les réacteurs de recherche.

Radioprotection : activités liées à l’énergie nucléaire, à l’exclusion des utilisations médicales par exemple. On trouvera des informations sur les installations de recherche et le nombre de chercheurs dans les universités dans *CRPPH sponsored survey of University level education programmes in radiation protection*, OCDE/AEN 2002⁵.

Dans les effectifs de la recherche doivent figurer toutes les personnes principalement ou partiellement affectées à la R-D. Le but est d’obtenir une estimation globale des ressources humaines disponibles. Ainsi, chaque personne ne doit être comptabilisée qu’une fois et classée dans la discipline la plus appropriée.

Veillez décrire brièvement si une installation importante (par exemple un accélérateur ou un appareillage d’essai de matériau pour des spécimens irradiés) existe, mais n’est pas présentée dans les autres rapports de l’AEN mentionnés ci-dessus. Dans le cas contraire, ajoutez une note si l’installation est déjà répertoriée dans d’autres rapports.

Tableau II.1. **Ressources humaines et installations de R-D**

Discipline	Ressources de recherche (effectif)		Installations importantes (oui/non, si oui, combien)
	Organismes publiques	Industrie	
Conception des réacteurs			
Étude sur les matériaux			
Étude sur les combustibles			
Gestion des déchets			
Démantèlement			
Autres			

3. Consultable à l’adresse : <http://www.nea.fr/html/nsd/reports/nea3144-research.pdf>

4. Consultable à l’adresse : <http://www.nea.fr/html/rwm/docs/2001/rwm2001-6-rev1.pdf>.

5. Consultable à l’adresse : <http://www.nea.fr/html/rp/docs/2001/crpph2001-8.pdf>.

Q II-2 Tendance de la R-D financée par l'industrie

Décrire comment ont évolué les priorités de la R-D financée par l'industrie au cours des 5 à 10 dernières années, par exemple

- long terme par opposition à court terme ;
- considérations de sûreté par opposition à considérations économiques ;
- réacteurs en exploitation par opposition à futurs systèmes de réacteurs ;
- projets nationaux par opposition à projets internationaux.

Q II-3 Financement de l'industrie pour la R-D libre

Votre entreprise finance-t-elle directement des projets de R-D dans des organisations de recherche ou des universités dont les résultats sont rendus publics, par exemple, dans des conférences, des publications ou sous forme de thèses ? Donner une évaluation de ce financement (personnes-années). Quelle est la finalité de ce financement (par exemple, assurer la disponibilité de nouveaux experts) ?

Q II-4 Tendance de la R-D bénéficiant d'un financement public

Décrire comment a évolué la R-D bénéficiant d'un financement public au cours des 5 à 10 dernières années, par exemple

- recherche fondamentale (long terme) par opposition à recherche appliquée et développement (court terme) ;
- considérations relatives à la sûreté par opposition à considérations économiques ;
- réacteurs en exploitation par opposition à systèmes de réacteur futurs ;
- projets nationaux par opposition à projets internationaux.

Q II-5 Financement public et expertise

Quel est le rôle du financement public dans le maintien de l'expertise et des moyens de R-D ? Existe-t-il un financement public pour les investissements dans l'infrastructure, par exemple pour construire de nouvelles installations d'essai ou de nouveaux appareillages d'essai ?

Q II-6 Financement public par opposition à financement privé

Quelle est la part du financement public dans le financement total de la R-D nucléaire ?

Q II-7 Financement de la R-D pour le développement à long terme

Votre pays participe-t-il à des initiatives internationales pour développer des concepts de réacteurs futurs, tels que Génération IV ou INPRO ? Si c'est le cas, quel est l'objectif ?

QUESTIONNAIRE
SECTION III

Collaboration internationale

Q III-1 Ressources pour la collaboration internationale

Veuillez compléter le tableau suivant

Tableau III.1. Collaboration internationale

Discipline	Chercheurs temporairement à l'étranger (% de personnes-années)	Proportion de chercheurs venant de l'étranger (% de personnes-années)	Utilisation des installations (voir tableau II.1) pour la collaboration internationale (%)	Part de la contribution dédiée à la collaboration internationale (% du financement total)
Conception des réacteurs				
Étude sur les matériaux				
Étude sur le combustible				
Gestion des déchets				
Démantèlement				
Radioprotection				
Autres				

Dans les chercheurs venant de l'étranger et les chercheurs temporairement à l'étranger, on inclut les chercheurs qui sont détachés par leur propre organisation pour travailler à l'étranger dans le cadre d'une activité de recherche en collaboration. Ne sont pas compris les travailleurs étrangers permanents. Donnez une estimation pour l'année 2002. Il s'agit d'évaluer l'importance des échanges de chercheurs au titre de la collaboration internationale.

Dans la colonne « Utilisation des installations pour la collaboration internationale », figure une estimation du pourcentage du temps d'exploitation d'une installation consacré à des projets de collaboration au niveau international.

Dans la colonne « Part de la contribution dédiée à la collaboration internationale », on prend en compte l'ensemble du financement de la R-D nucléaire qui est utilisé pour financer les activités de R-D réalisées dans le cadre d'une collaboration multilatérale ou bilatérale.

Donnez une estimation du rapport entre fonds destinés à des projets en collaboration multilatéraux et fonds destinés à des projets en collaboration bilatéraux.

Q III-2 Enseignements tirés de la collaboration internationale

1. En vous fondant sur l'expérience générale de votre pays, veuillez donner un ou deux exemples de bonnes pratiques concernant les projets de R-D internationaux dans le domaine nucléaire.
2. Quels sont les principaux arguments en faveur de la collaboration internationale ?
3. Quels sont les principaux arguments contre ou les obstacles ?
4. Des critères sont-ils utilisés pour mesurer la valeur de la R-D en général et de la collaboration internationale en particulier ?
5. Existe-t-il des restrictions à l'utilisation des instruments de financement publics nationaux pour la collaboration internationale, par exemple financements strictement limités à des organisations nationales ?
6. Existe-t-il des obstacles structurels qui entravent la collaboration internationale ?
7. Les instruments de financement de la R-D contiennent-ils des mesures d'incitation en faveur de la collaboration internationale ou de l'échange d'experts et de chercheurs ? Y a-t-il des difficultés (permis de travail, sécurité sociale, etc.) qui font obstacle à la collaboration et à l'échange d'experts ?

ÉGALEMENT DISPONIBLE

Publication de l'AEN d'intérêt général

AEN Infos

ISSN 1605-959X

Abonnement 2005 : € 49 US\$ 56 GBP 31 ¥ 6 600

Brochure AEN

Gratuit : versions papier ou web.

Développement de l'énergie nucléaire

Développement des compétences dans le domaine de l'énergie nucléaire (2004)

Rapport de synthèse

ISBN 92-64-02074-8

Gratuit : versions papier ou web.

Uranium 2003: Ressources, production et demande (2004)

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

ISBN 92-64-01674-0

Prix € 85 US\$ 106 GBP 59 ¥ 10 900

Données sur l'énergie nucléaire – 2004 (2004)

Bilingue

ISBN 92-64-10326-0

Prix : € 21 US\$ 26 GBP 15 ¥ 2 700

Gouvernement et énergie nucléaire (2004)

ISBN 92-64-01539-6

Prix : € 21 US\$ 26 GBP 15 ¥ 2 700

Énergie nucléaire aujourd'hui (L') (2003)

ISBN 92-64-10329-5

Prix : € 21 US\$ 24 GBP 14 ¥ 2 700

Démantèlement des centrales nucléaires (2003)

Politiques, stratégies et coûts

ISBN 92-64-10432-1

Prix : € 40 US\$ 46 GBP 27 ¥ 5 100

Cycle du combustible nucléaire (Le) (2002)

Aspects économiques, environnementaux et sociaux

ISBN 92-64-29664-6

Prix : € 37 US\$ 33 GBP 23 ¥ 3 700

Réaménagement de l'environnement des sites de production d'uranium (2002)

ISBN 92-64-29509-7

Prix : € 70 US\$ 63 GBP 43 ¥ 7 050

Électricité nucléaire : quels sont les coûts externes ? (2003)

ISBN 92-64-02154-X

Gratuit : versions papier ou web.

Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation (2003)

Proceedings of the Seventh Information Exchange Meeting,

Jeju, Republic of Korea, 14-16 December 2002

ISBN 92-64-02125-6

Gratuit : versions papier ou web.

Société et énergie nucléaire : vers une meilleure compréhension (2002)

ISBN 92-64-28494-X

Gratuit : versions papier ou web.

Bon de commande au dos.

Questionnaire sur la qualité des publications de l'OCDE

Nous voudrions savoir si nos publications répondent à vos souhaits en matière de présentation et de contenu éditorial. Nous souhaiterions recueillir vos réactions et commentaires pour d'éventuelles améliorations. Merci de prendre quelques minutes pour compléter ce questionnaire. Les réponses sont échelonnées de 1 à 5 (1 = médiocre, 5 = excellent).

Faxez ou postez votre réponse avant le 31 décembre 2004 et vous serez inscrit automatiquement sur la liste des gagnants potentiels à l'abonnement d'un an au magazine *L'Observateur de l'OCDE**.

A. Présentation et mise en pages

1. Que pensez-vous de la présentation et de la mise en pages du point de vue :

	Médiocre		Convenable		Excellent
Lisibilité (caractères, ou fonte)	1	2	3	4	5
Structure du livre	1	2	3	4	5
Tableaux statistiques	1	2	3	4	5
Graphiques	1	2	3	4	5

B. Impression et reliure

2. Que pensez-vous de la qualité de l'édition imprimée ?

Qualité de l'impression	1	2	3	4	5
Qualité du papier	1	2	3	4	5
Type de reliure	1	2	3	4	5
J'utilise surtout la version électronique	<input type="checkbox"/>				

3. Quel type de support préférez-vous pour les publications en général ?

Livre CD Livre électronique (PDF) via Internet Combinaison de supports

C. Contenu

4. Considérez-vous le contenu de cette publication précis et à jour ? (notez de 1 à 5)

1 2 3 4 5

5. Les titres de chapitres, têtes et sous-titres sont-ils ?

Clairs Oui Non
Significatifs Oui Non

6. Comment évaluez-vous le style de la publication (langue, syntaxe, grammaire) ? (notez de 1 à 5)

1 2 3 4 5

D. En général

7. Avez-vous d'autres commentaires à ajouter sur la publication ?

.....
.....
.....

Dites-nous qui vous êtes :

Nom : E-mail :

Fax :

A quelle catégorie appartenez-vous ?

Organisations intergouvernementales Organisations non gouvernementales Travailleur indépendant
Étudiant Universitaire Fonctionnaire Politicien Secteur privé

Nous vous remercions d'avoir complété le questionnaire. Vous pouvez faxer vos réponses au (33-1) 49 10 42 81 ou les envoyer par courrier à l'adresse suivante :

Questionnaire qualité PAC/PROD, Division des publications de l'OCDE
23, rue du Dôme – 92100 Boulogne-Billancourt – France.

Titre : Développement des compétences dans le domaine de l'énergie nucléaire

Code OCDE (version imprimée) : 66 2004 13 2 P

* Nota bene : Cette offre ne concerne pas le personnel de l'OCDE.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(66 2004 13 2 P) – n° 53746 2004

© OECD, 1999.

© Software: 1987-1996, Acrobat is a trademark of ADOBE.

All rights reserved. OECD grants you the right to use one copy of this Program for your personal use only. Unauthorised reproduction, lending, hiring, transmission or distribution of any data or software is prohibited. You must treat the Program and associated materials and any elements thereof like any other copyrighted material.

All requests should be made to:

Head of Publications Service,
OECD Publications Service,
2, rue André-Pascal, 75775 Paris
Cedex 16, France.

© OCDE, 1999

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

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

Les demandes sont à adresser au :

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