



AEN Infos

Volume 26

2008

Table des matières

AEN Infos est publié deux fois par an, en anglais et en français, par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire. Les opinions exprimées n'engagent que les auteurs des articles et ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'Organisation ou ceux des pays membres. Les informations contenues dans *AEN Infos* peuvent être librement utilisées, à condition d'en citer la source. La correspondance doit être adressée comme suit :

Secrétariat de rédaction
AEN Infos, OCDE/AEN
12, boulevard des Îles
92130 Issy-les-Moulineaux
France
Tél. : +33 (0)1 45 24 10 12
Fax : +33 (0)1 45 24 11 12

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) est une organisation intergouvernementale qui a été fondée en 1958. Son principal objectif 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. Elle est une source d'informations, de données et d'analyses non partisane et constitue l'un des meilleurs réseaux d'experts techniques internationaux. Elle comprend actuellement 28 pays membres : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie.

Pour plus d'informations sur l'AEN, voir :
www.nea.fr

Comité de rédaction :
Janice Dunn Lee
Karen Daifuku
Cynthia Gannon-Picot

Production/recherche photographique :
Solange Quarmeau

Mise en page/graphiques :
Annette Meunier
Andrée Pham Van

Page de couverture : *Intervenants à la session à haut niveau tenue à l'occasion du 50^e anniversaire de l'AEN le 16 octobre 2008 au Centre de conférences de l'OCDE, à Paris (Gilles Bassignac, France).*

Faits et opinions

<i>Perspectives de l'énergie nucléaire 2008 – Sommaire exécutif</i>	4
La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire	21
Défis pour la science des matériaux	25

Actualités

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques : archives marqueurs et populations	28
Le retour d'expérience acquise en cours d'exploitation	33
La communication des autorités de sûreté : 10 ans de progrès	36

Nouvelles brèves

Actualité juridique : Turquie	39
Phase IV du projet TDB	40
Tout sur l'uranium	42

Nouvelles publications	43
------------------------	----

Session à haut niveau du 50^e anniversaire de l'AEN

Le 16 octobre 2008, l'AEN a célébré son 50^e anniversaire avec plus de 350 personnes présentes. Une section spéciale du site internet de l'Agence a été mise en place à cette occasion. On y retrouve des informations sur les intervenants et les séquences vidéos complètes de la session à haut niveau (voir www.nea.fr/html/general/50th).



Photos: Gilles Bassignac.

De gauche à droite, dans l'ordre d'intervention :

M. Angel Gurría, *Secrétaire général de l'OCDE* ;
M. Mohamed ElBaradei, *Directeur général, Agence internationale de l'énergie atomique* ;
M. Luis E. Echávarri, *Directeur général, Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire*

M. Miguel Sebastián Gascón, *Ministre de l'industrie, du tourisme et du commerce, Espagne* ;
M. Claudio Scajola, *Ministre du développement économique, Italie* ;
M. Lubomír Jahnátek, *Ministre de l'économie, République slovaque*

M. Pierre-Franck Chevet, *Directeur général de l'énergie et du climat, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, France* ;
M. Dennis R. Spurgeon, *Vice-ministre de l'énergie nucléaire, États-Unis* ;
M. Shunichi Tanaka, *Vice-président, Commission de l'énergie atomique, Japon*

M. Tomáš Hüner, *Vice-ministre de l'industrie et du commerce, République tchèque* ;
M. Dale E. Klein, *Président, Autorité de sûreté nucléaire (NRC), États-Unis* ;
M. Aris S. Candris, *Président-directeur général, Westinghouse Electric Company*

M. André-Claude Lacoste, *Président, Autorité de sûreté nucléaire, France* ;
M. Hugh MacDiarmid, *Président-directeur général, Énergie atomique du Canada limitée* ;
M. Luc Oursel, *Président, AREVA NP*

M. Pierre Gadonneix, *Président-directeur général, Électricité de France (EDF) et Président, Conseil mondial de l'énergie* ;
M. Nobuo Tanaka, *Directeur exécutif, Agence internationale de l'énergie (AIE)* ;
M. Richard J.K. Stratford, *Président, Comité de direction de l'énergie nucléaire de l'OCDE*

Les 50 ans de l'AEN



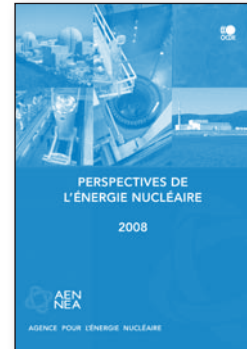
En 2008, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a célébré son 50^e anniversaire. Au fil des ans, elle a joué un rôle déterminant, renforçant les liens de la coopération internationale mais aussi la qualité de cette collaboration. Elle a tiré le meilleur parti des contributions de ses membres, réussi à mobiliser efficacement les moyens financiers nécessaires à la réalisation d'études et de projets de recherche internationaux novateurs, mais surtout à stimuler et conjuguer les synergies de son vaste réseau de spécialistes travaillant sur les programmes nucléaires les plus avancés de la planète.

À l'heure où le nucléaire se trouve à un tournant important dans son développement, l'AEN est particulièrement bien placée pour s'assurer que ce développement se réalise dans des conditions sûres et rentables et dans le respect de l'environnement. Elle continuera également de travailler à l'élaboration des bases scientifiques, technologiques et juridiques sans quoi ces objectifs ne pourront être atteints. Pendant 50 ans, l'AEN a constitué une enceinte de premier plan au service de la coopération internationale portant sur les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire, et fera tout son possible pour continuer d'offrir une valeur ajoutée maximale à ses pays membres.

Luis E. Echávarri
Directeur général de l'AEN

Perspectives de l'énergie nucléaire 2008

Pour marquer son 50^e anniversaire, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire a publié la première édition des *Perspectives de l'énergie nucléaire*. Cette publication s'inscrit dans une nouvelle dynamique marquée par un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire à un moment où la sécurité énergétique, le changement climatique et les coûts de l'énergie sont devenus des priorités des politiques énergétiques à court et à long terme.



À partir des données et statistiques les plus récentes, les Perspectives présentent des projections jusqu'à l'horizon 2050 afin d'examiner des scénarios de croissance et leurs implications possibles sur l'exploitation future de l'énergie nucléaire. Elles offrent aussi des analyses inédites et des recommandations sur les défis potentiels de demain.

Ces Perspectives abordent les sujets suivants :

- la situation actuelle du nucléaire et ses évolutions prévues ;
- ses répercussions sur l'environnement ;
- les ressources en uranium et la sécurité d'approvisionnement ;
- les coûts, la sûreté et la réglementation ;
- la gestion des déchets radioactifs et le démantèlement ;
- la non-prolifération et la sécurité ;
- les régimes juridiques ;
- les infrastructures ;
- la participation du public ;
- les réacteurs et les cycles du combustible avancés.

La publication est disponible en anglais et en français et peut être achetée en ligne à www.oecdbookshop.org. Une version japonaise sera bientôt disponible.

Les sommaires exécutifs des Perspectives peuvent être téléchargés gratuitement depuis le site internet de l'AEN (www.nea.fr/neo) en allemand, en anglais, en chinois, en coréen, en espagnol, en français, en hongrois, en italien, en japonais et en russe.

Nous avons le plaisir d'offrir à nos lecteurs le Sommaire exécutif en français dans les pages qui suivent.

Perspectives de l'énergie nucléaire 2008

ISBN 978-92-64-05416-5. 500 pages. Prix : € 105, US\$ 161, £ 81, ¥ 16 800.

Principaux messages

Satisfaire la demande d'énergie mondiale en maîtrisant ses répercussions environnementales, sociales et politiques

De l'avis général, satisfaire les besoins énergétiques indispensables à la poursuite du progrès social et économique tout en maîtrisant les répercussions environnementales et sociopolitiques potentielles constitue un défi majeur du 21^e siècle. D'ici 2050, la demande mondiale d'électricité devrait être multipliée par 2,5 environ.

L'énergie, et en particulier l'électricité, est indispensable au développement économique et social et à la qualité de la vie, mais tous s'accordent à dire que les comportements énergétiques du siècle dernier ne sont plus viables. La planète est confrontée aux menaces que fait peser sur l'environnement le changement climatique provoqué par les émissions anthropiques de CO₂ et aux menaces sociopolitiques que peuvent entraîner la hausse des prix de l'énergie et l'éventuelle pénurie de sources d'énergie.

- La production d'électricité, qui est responsable d'environ 27% des émissions anthropiques mondiales de CO₂, est de loin la source de gaz à effet de serre la plus importante et, qui plus est, celle qui augmente le plus vite.
- La sécurité d'approvisionnement est devenue une préoccupation majeure, notamment des pays

aux ressources limitées en combustibles fossiles qui sont, par conséquent, dépendants de leurs importations d'énergie.

Dans les scénarios du « statu quo », la vigoureuse croissance économique de nombreux pays en développement, se traduisant par des modes de vie plus énergivores, et une croissance démographique mondiale de 50 %, concentrée dans les régions en développement, sont les moteurs de l'augmentation de la demande d'énergie. Pour répondre à cette demande, la consommation de combustibles fossiles poursuivra inexorablement sa progression à moins que les pouvoirs publics ne changent de politiques énergétiques à l'échelle mondiale. L'énergie nucléaire peut apporter une contribution importante à la résolution de ces problèmes.

Contribution actuelle et probable de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement en énergie de la planète

En 2006, les centrales nucléaires ont produit 2,6 milliards de MWh, soit 16 % de l'électricité de la planète et 23 % de l'électricité des pays de l'OCDE.

- En juin 2008, 439 réacteurs nucléaires étaient en service dans 30 pays et une économie, représentant une puissance installée totale de 372 GWe.
- La France, le Japon et les États-Unis détiennent 57 % de la puissance nucléaire installée dans le monde. Seize pays produisaient, en 2007, un quart de leur électricité dans des centrales nucléaires.

En juin 2008, 41 réacteurs étaient en construction dans 14 pays et une économie. Il est courant dans les pays d'Asie de parvenir à des durées de construction de 62 mois, en moyenne. Sur les 18 tranches connectées au réseau entre décembre 2001 et mai 2007, trois ont été construites en 48 mois ou moins.

Les plans actuels et les déclarations d'intention d'autorités nationales indiquent que les pays qui auraient la plus importante puissance nucléaire installée en 2020 seraient les États-Unis, la France, le Japon, la Fédération de Russie, la Chine et la Corée. C'est en Chine et aux États-Unis que les plus fortes augmentations de la puissance installée sont prévues.

L'AEN a effectué des projections de la puissance nucléaire mondiale jusqu'en 2050 à partir de scénarios haut et bas. Le résultat est le suivant :

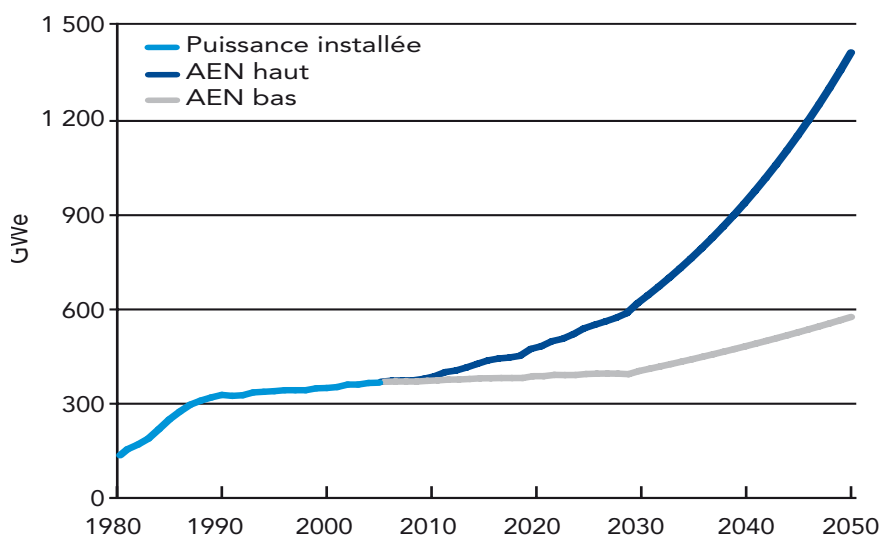
- D'ici 2050, la puissance nucléaire installée dans le monde devrait augmenter d'un facteur situé entre 1,5 et 3,8.

- Dans le scénario haut, la contribution du nucléaire à la production mondiale d'électricité passerait de 16 % aujourd'hui à 22 % en 2050.
- Dans les deux scénarios, ce sont les pays de l'OCDE principalement qui produiront de l'électricité nucléaire.
- Certains pays jusqu'alors dépourvus de centrales nucléaires ont l'intention de rejoindre les pays dotés de parcs électronucléaires, mais ils

ne devraient au mieux augmenter que de 5 % environ la puissance nucléaire installée mondiale d'ici 2020.

Ces projections concordent globalement avec celles d'autres organisations. D'après l'expérience passée, il sera possible de construire des centrales nucléaires à un rythme suffisant largement à satisfaire la demande prévue dans le scénario haut de l'AEN à l'horizon 2050.

Projections de la capacité nucléaire – scénarios haut et bas de l'AEN



Contribution de l'énergie nucléaire à la réduction des effets négatifs de la croissance de la demande d'énergie

L'énergie nucléaire pourrait contribuer de manière significative à la réduction des émissions de CO₂, à la sécurité énergétique et à la réduction des effets sanitaires graves de la combustion des combustibles fossiles.

Changement climatique

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies a conclu qu'il faut réduire de moitié les émissions de CO₂, y compris celles imputables à la production d'électricité, si l'on veut pouvoir maintenir à un niveau tolérable les conséquences du changement climatique.

- L'analyse de l'intégralité du cycle de vie montre que l'énergie nucléaire ne produit pratiquement pas de carbone.
- Seule l'alliance de différentes techniques de production permettra d'atteindre cet objectif ambitieux, mais l'énergie nucléaire est la seule technol-

ogie qui ait prouvé qu'elle était capable de réduire les émissions de carbone à l'échelle voulue.

- L'énergie nucléaire pourrait prendre une part croissante à la production d'électricité, mais aussi de chaleur, pratiquement sans émettre de carbone. Les études et recherches entreprises dans le monde sur la production dans des centrales nucléaires d'hydrogène destiné au secteur des transports peuvent déboucher sur des applications importantes.

Les coûts externes (à savoir ceux qui n'entrent pas dans les prix, y compris les conséquences du changement climatique) sont pour la plupart déjà internalisés dans le cas de l'énergie nucléaire, tandis que dans celui des combustibles fossiles, les coûts

externes sont presque aussi importants que les coûts directs.

Sécurité énergétique

Plus que le pétrole et le gaz, l'énergie nucléaire est en mesure de garantir la sécurité d'approvisionnement car son combustible, l'uranium, provient de sources diverses et, de plus, les principaux fournisseurs opèrent dans des pays politiquement stables.

- Il y a suffisamment de ressources en uranium identifiées pour soutenir le développement de la puissance nucléaire installée dans le monde sans faire appel au retraitement, jusqu'en 2050 au moins. Les ressources supplémentaires que laissent entrevoir les données géologiques locales devraient garantir un approvisionnement en uranium de plusieurs centaines d'années.
- Si les programmes nucléaires devaient se développer dans de fortes proportions au niveau mondial, la base de ressources identifiées aujourd'hui permettrait d'assurer l'approvisionnement des réacteurs pendant plusieurs milliers d'années. Toutefois, il faudrait pour ce faire exploiter des surgénérateurs rapides, une technologie au point, mais qui n'est pas encore exploitée industriellement.

- En raison de la forte densité énergétique de l'uranium (1 tonne d'uranium produit autant d'énergie que 10 000 à 16 000 tonnes de pétrole avec les techniques actuelles), son transport est moins vulnérable que celui des combustibles fossiles et il est plus facile de constituer d'importantes réserves énergétiques d'uranium que de combustibles fossiles.

Effets sanitaires

Le recours à l'énergie nucléaire pourrait réduire les risques sanitaires liés à l'utilisation des combustibles fossiles.

- Les effets sanitaires des émissions des centrales nucléaires sont négligeables comparés à ceux résultant de l'utilisation de combustibles fossiles.
- Les décès dus aux effets sanitaires des émissions produites lors de la combustion des combustibles fossiles sont sans commune mesure avec ceux qui résultent des accidents liés à toutes les sources d'énergie.
- La comparaison de la fréquence et des conséquences d'accidents réels sur toute la chaîne énergétique montre que, contrairement à la croyance populaire, l'énergie nucléaire présente un risque d'accident nettement inférieur à celui des sources d'énergies fossiles.

Affronter les défis de la croissance de la production d'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire permettrait de satisfaire une grande partie de la hausse prévue de la demande d'électricité avec des effets environnementaux, politiques et économiques potentiels bien moindres que ceux associés aux combustibles fossiles. Toutefois, une fraction importante de l'opinion publique juge que les risques de l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages. L'industrie nucléaire et les gouvernements qui souhaitent recourir à cette énergie doivent gérer les problèmes réels ou perçus que posent la sûreté, le stockage des déchets et le démantèlement, la non-prolifération et la sécurité ainsi que les coûts.

Sûreté

La sûreté nucléaire est un enjeu à l'échelle planétaire : un accident grave dans un pays peut avoir un impact significatif sur les pays voisins. L'industrie a placé la sûreté et la protection de l'environnement au premier rang de ses priorités et doit les y maintenir. Un contrôle réglementaire efficace restera donc un impératif primordial.

- Les niveaux de sûreté atteints dans les centrales et les autres installations nucléaires des pays membres de l'OCDE sont excellents, comme le montrent plusieurs indicateurs de sûreté. Ce palmarès

témoigne de la maturité de l'industrie et de la robustesse de son système réglementaire.

- Les performances de sûreté de l'industrie nucléaire n'ont cessé de progresser au cours des dernières décennies. Les nouveaux modèles de réacteurs sont dotés de systèmes passifs dont la particularité est de maintenir la centrale dans un état sûr, notamment lors d'un événement imprévu, sans nécessiter de commande active.
- Devant l'intérêt croissant manifesté pour la construction de centrales nucléaires et pour les

filières de nouvelle génération, la communauté internationale a lancé des initiatives afin d'améliorer l'efficacité et l'efficience de la réglementation.

- Il convient d'aider les pays inexpérimentés à mettre en place des pratiques industrielles, réglementaires et juridiques satisfaisantes s'ils décident de construire des centrales nucléaires.

Stockage définitif des déchets et démantèlement

Les reports et échecs de certains grands programmes de stockage définitif de déchets de haute activité continuent de ternir fortement l'image de l'énergie nucléaire. Les gouvernements et l'industrie nucléaire doivent travailler ensemble pour mettre en service des installations sûres de stockage définitif.

- Comme aucun dépôt de combustible nucléaire usé et de déchets de haute activité issus du retraitement n'a encore été aménagé, la construction de ces installations est jugée par certains techniquement difficile, voire impossible.
- En réalité, le volume de déchets radioactifs produits est faible, les technologies pour les gérer existent et, de plus, il y a un consensus international sur la faisabilité technique et la sûreté du stockage en formation géologique des déchets de haute activité.
- Diverses installations nucléaires ont été démantelées sans problème, dont, aux États-Unis, plusieurs centrales d'une puissance supérieure à 100 MWe, aujourd'hui entièrement démontées.
- Les coûts de la gestion des déchets et du démantèlement des centrales nucléaires représentent 3 % seulement des coûts totaux de production de l'électricité nucléaire. Les mécanismes de financement de la gestion des déchets et du démantèlement sont en place.

Non-prolifération et sécurité

La communauté nucléaire internationale doit se mobiliser pour éviter la dissémination des armes nucléaires par des États et l'usage délictueux des substances radioactives par des groupes terroristes ou des associations criminelles.

- Depuis une quarantaine d'années, le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires est le socle juridique et politique sur lequel repose le régime international qui a permis de limiter la dissémination des armes nucléaires.
- Les approches multilatérales du cycle du combustible nucléaire actuellement envisagées permettraient d'apporter à la communauté internationale la garantie que les technologies nucléaires présentant un risque de prolifération ne risquent pas de se propager.

- Les systèmes nucléaires avancés possèdent des caractéristiques techniques conçues pour en améliorer la résistance à la prolifération et la robustesse en cas de menaces de sabotage ou d'attentat terroriste.

Coûts

Sur la base des coûts actualisés, la construction et l'exploitation des centrales nucléaires sont économiquement viables dans la plupart des situations. Toutefois, les gouvernements qui souhaiteraient encourager l'investissement dans des centrales nucléaires devront veiller à limiter les risques financiers liés à la procédure d'autorisation et à la planification ainsi que ceux que les financiers associent à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement.

- Une comparaison internationale des coûts actualisés de la production d'électricité dans des centrales nucléaires, au charbon et au gaz, effectuée en 2005, a montré que le nucléaire concurrence le charbon et le gaz, de façon plus ou moins nette en fonction des circonstances locales. Depuis, les prix du pétrole ont quadruplé (au mois de juin 2008), et ceux des autres énergies fossiles les ont suivis.
- Le coût de l'uranium ne représente qu'environ 5 % du coût total de la production d'électricité nucléaire.
- Le défi économique pour l'énergie nucléaire concerne le financement des investissements plutôt que le coût actualisé de production d'électricité.
- L'amélioration de la disponibilité, l'augmentation de la puissance des centrales et le renouvellement des autorisations ont permis, dans bien des cas, de tirer davantage de profit des investissements effectués à ce jour dans l'énergie nucléaire. En moyenne dans le monde, la disponibilité a progressé de 10 % ces 15 dernières années pour atteindre aujourd'hui 83 %. De nombreuses centrales ont vu leur puissance augmenter, parfois de 20 %. De plus, la durée de vie de nombreux réacteurs a été prolongée de 40 à 60 ans.

L'énergie nucléaire et la société

Si l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.

- D'après les sondages, la moitié des citoyens de l'Union européenne sont convaincus que les risques de l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages.

- Toutefois, leur préoccupation concerne davantage certains aspects périphériques à l'énergie nucléaire (déchets radioactifs, terrorisme et prolifération) que le fonctionnement proprement dit des centrales nucléaires.
- L'adhésion à l'énergie nucléaire croît avec la connaissance que l'on en a mais la plupart des gens estiment mal la connaître.
- Les scientifiques et les organisations non gouvernementales (ONG) sont jugés les plus dignes de confiance pour assurer l'information du public.
- Si l'on veut faire accepter l'énergie nucléaire comme partie intégrante de la politique énergétique nationale, les mécanismes participatifs et les dispositions pour gagner la confiance du public devraient revêtir une importance croissante.

Mise au point de la technologie

La génération actuelle de réacteurs est capable d'excellentes performances. Ces réacteurs assureront l'essentiel de la croissance du nucléaire dans les 20 à 30 prochaines années. La coopération internationale engagée pour développer des concepts et cycles du combustible laisse entrevoir de nouvelles avancées.

Réacteurs avancés

Les futurs réacteurs à eau ordinaire, qui seront probablement les principales filières de réacteurs exploitées jusqu'au milieu du siècle, seront des réacteurs de génération III+, dotés de caractéristiques de sûreté améliorées et plus intéressants sur le plan économique. Il existe aujourd'hui quatre réacteurs de cette génération en exploitation ou en chantier.

- Les futurs réacteurs à haute température à caloporteur gaz qui devraient être exploitables à l'échelle industrielle autour de 2020 fonctionneront à des températures suffisamment élevées pour produire l'hydrogène utilisé comme carburant dans les transports, et pour d'autres applications de la chaleur de procédé.
- Les réacteurs de petite puissance conçus pour les pays en développement reposent sur des approches de sûreté intrinsèque et passive, particulièrement intéressantes pour des pays ayant une expérience limitée de l'énergie nucléaire. Toutefois, ces technologies n'ont pas encore atteint le niveau du développement commercial.
- Les concepts de systèmes nucléaires de quatrième génération, qui devraient être exploités à l'échelle industrielle après 2030, se caractérisent par une meilleure résistance à la prolifération et une protection physique accrue. Des initiatives internationales visent à soutenir le développement, dans des conditions sûres et durables, d'une énergie nucléaire fiable, à un prix concurrentiel, et qui produise un minimum de déchets.
- L'énergie de fusion, qui n'en est qu'au stade expérimental, ne devrait pas pouvoir être déployée pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle au mieux avant la seconde moitié du siècle.

Cycles du combustible actuels et avancés

À l'heure actuelle, les pays se partagent entre ceux qui retraitent leur combustible nucléaire et ceux qui ne le font pas. Des trois pays qui possèdent les plus grands parcs nucléaires, la France et le Japon retraitent aujourd'hui leur combustible nucléaire, les États-Unis ne le retraitent pas. De nombreux pays envisagent et mettent au point des cycles de retraitement avancés, y compris les États-Unis.

- Le retraitement du combustible utilisé déjà produit permettrait d'alimenter les réacteurs à eau ordinaire pendant 700 années-réacteur environ. Les autres sources secondaires potentielles de combustible pourraient porter cette durée à plus de 3 000 années-réacteur.
- Les réacteurs rapides associés à des cycles du combustible fermés, tels que ceux qui sont envisagés par le Forum international Génération IV, peuvent être conçus pour brûler les stocks existants de plutonium ou pour produire du plutonium à partir d'isotopes non fissiles de l'uranium. Dans ce dernier cas, l'énergie extraite d'une quantité donnée d'uranium peut être multipliée par 60, prolongeant ainsi les ressources d'uranium pendant des milliers d'années.
- Le retraitement présente également l'avantage, en termes de gestion du combustible utilisé, de réduire fortement les volumes de déchets de haute activité qu'il faut ensuite stocker dans des formations géologiques.
- Les cycles du combustible avancés permettraient de séparer les isotopes à vie longue à l'échelle commerciale puis de les réirradier pour les éliminer. La radioactivité des déchets issus du combustible nucléaire utilisé décroîtrait ensuite naturellement, en quelques centaines d'années, à un niveau inférieur à celui de l'uranium à partir duquel le combustible a été produit.

Synthèse

Conséquences politiques, sociales et environnementales de la demande d'énergie mondiale au 21^e siècle

Satisfaire les besoins énergétiques indispensables à la poursuite du progrès social et économique tout en maîtrisant les répercussions environnementales et sociopolitiques potentielles constitue un défi majeur du 21^e siècle.

L'énergie, et en particulier l'électricité, est essentielle au développement économique et social et à une meilleure qualité de la vie, mais il ne sera plus viable, de l'avis général, de la consommer au même rythme qu'au siècle dernier. La planète est confrontée aux menaces que fait peser sur l'environnement le changement climatique pro-

voqué par les émissions anthropiques de CO₂ et aux menaces sociopolitiques que peuvent entraîner la hausse des prix de l'énergie et l'éventuelle insécurité d'approvisionnement en énergie.

La vigoureuse croissance économique de nombreux pays en développement, se traduisant par des modes de vie plus énergivores ainsi que le doublement prévu de la population mondiale, principalement dans les régions en développement, pousseront la demande d'énergie à la hausse au 21^e siècle. Actuellement, la consommation d'énergie annuelle par habitant varie profondément suivant les pays, voire d'une région à l'autre. Les pays en développement aujourd'hui, qui représentent les trois quarts de la population mondiale, ne consomment qu'un quart de l'énergie de la planète. D'ici 2050, si les politiques publiques restent identiques, l'offre totale d'énergie primaire et la demande mondiale d'électricité devraient avoir augmenté d'un facteur de 2,5.

Si la plupart des pays continuent de suivre leurs politiques actuelles, la consommation de combustibles fossiles poursuivra sa

croissance inexorable pour satisfaire cette demande toujours plus forte, tandis que l'énergie nucléaire n'occupera pas une place importante. Cette poussée de la consommation de combustibles fossiles n'entraîne pas seule-

ment une augmentation des émissions de CO₂, dont la science et l'expérience récente ont montré

les répercussions sur le climat, mais une instabilité politique et économique provoquée par la moindre sécurité d'approvisionnement et la hausse des prix de l'énergie.

Dans le plus récent de ses importants rapports, qui a été publié en 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement climatique montre qu'il est impératif d'opter pour des sources d'énergie écologiques si l'on veut maîtriser les émissions atmosphériques de gaz à effet de serre, en particulier du CO₂. La production d'électricité, qui est responsable de 27 % des émissions mondiales anthropiques de CO₂, est de loin la source la plus importante de gaz à effet de serre et celle qui augmente le plus vite.

En 2005, la plupart des habitants de la planète consommaient nettement moins de 4 000 kWh par habitant, soit le seuil en-deçà duquel l'espérance de vie et le niveau d'éducation diminuent rapidement. D'ici 2030, ce sont l'Inde et la Chine qui devraient connaître la plus forte croissance de la demande d'électricité. Aux États-Unis, cette demande a poursuivi son ascension sans discontinuer au cours des 55 dernières années et ne montre aucun signe de ralentissement. D'autres pays aspirent à atteindre le niveau de développement économique des pays de l'OCDE, et devraient voir leur demande d'énergie suivre un jour le même schéma, ce qui laisse à penser que la demande d'électricité a peu de chance de se stabiliser.

Si les projections de la population mondiale des Nations Unies ainsi que du produit intérieur brut par habitant et de l'intensité énergétique du GIEC se vérifient, l'intensité de carbone du système énergétique mondial devra être divisée par 4 pour parvenir à réduire de 50 % les émissions de CO₂ comme le juge nécessaire le GIEC pour stabiliser le changement climatique. Or, il s'agit là d'un défi considérable à en juger par les données du GIEC qui montrent que l'intensité de carbone s'est améliorée de moins de 10 % au cours des 35 dernières années.

D'ici 2050, tant l'offre totale d'énergie primaire que la demande mondiale d'électricité devraient avoir augmenté d'un facteur de 2,5.

Si les prévisions se confirment, les émissions moyennes de CO₂ par unité d'énergie consommée devront être divisées par 4 à l'horizon 2050.

La sécurité d'approvisionnement est devenue une préoccupation majeure dans le monde, notamment des pays détenant peu de ressources en combustibles fossiles qui sont par conséquent dépendants de leurs importations d'énergie. Les

réserves de pétrole et de gaz facilement exploitables sont concentrées dans un petit nombre de pays du Moyen-Orient et en Fédération de Russie, ce qui s'est révélé une importante source de tension au cours des dernières décennies.

Contribution actuelle et probable de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement en énergie de la planète

En principe, l'énergie nucléaire pourrait satisfaire une proportion significative de la hausse prévue de la demande d'électricité.

L'énergie nucléaire pourrait satisfaire une proportion significative de la hausse prévue de la demande d'électricité, et ainsi contribuer à réduire les effets environnementaux, politiques et économiques associés à la consommation de combustibles fossiles.

Contribution actuelle de l'énergie nucléaire à l'approvisionnement mondial

Les premières centrales nucléaires civiles ont été construites dans les années 50, et l'industrie nucléaire a pris son essor dans les années 70 et 80. Les accidents de Three Mile Island (1979) et de Tchernobyl (1986), et la chute des prix des combustibles fossiles au milieu des années 80 ont mis fin à son déploiement rapide.

En juin 2008, 439 réacteurs nucléaires étaient en service dans 30 pays et une économie, et cumulaient une puissance totale de 372 GWe. Les centrales nucléaires ont produit 2,6 milliards MWh en 2006, soit 16 % de l'électricité dans le monde et 23 % dans les pays membres de l'OCDE. L'expérience d'exploitation des centrales nucléaires dépasse aujourd'hui 12 700 années-réacteur sur la planète toute entière. La France, le Japon et les États-Unis détiennent 57 % de la puissance nucléaire installée dans le monde ; en 2007, 16 pays produisaient plus d'un quart de leur électricité dans ce type de centrales.

En 2006, 439 réacteurs ont assuré 16 % de la production mondiale d'électricité et 23 % de celle des pays de l'OCDE.

En juin 2008, 41 réacteurs de puissance étaient en construction dans 14 pays et une économie. Lorsqu'ils seront achevés, la puissance installée mondiale aura augmenté de 9,4 %. Les pays d'Asie parviennent régulièrement à des durées de construction de 62 mois en moyenne. Sur les 18 tranches connectées au réseau entre le mois de décembre 2001 et le mois de mai 2007, trois ont été construites en 48 mois ou moins.

La quantité d'énergie produite grâce aux investissements dans l'énergie nucléaire s'est améliorée

avec la disponibilité, l'augmentation de la puissance et des renouvellements d'autorisations. Le coefficient de disponibilité en énergie des centrales de la planète s'est fortement accru au cours des dix dernières années ; bien que la puissance installée n'ait progressé que de 1 % par an, la production d'électricité nucléaire elle, a augmenté au rythme de 2,5 % par an. Les augmentations de puissance des centrales existantes ont permis également d'accroître d'environ 7 GWe la puissance nucléaire installée mondiale et, aux États-Unis, 48 réacteurs avaient, en mai 2008, obtenu un renouvellement d'autorisation prolongeant leur durée de vie de 40 à 60 ans, soit jusqu'en 2046 pour la dernière centrale.

Bien qu'en majorité les services du cycle du combustible soient concentrés aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France et au Royaume-Uni, 18 pays sont capables de fabriquer du combustible, éventuellement en important de l'uranium enrichi.

Contribution probable de l'énergie nucléaire dans l'avenir

Les constructions de centrales doivent se multiplier en particulier en Chine, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en Inde et en Ukraine. Les pays d'Europe de l'Ouest n'ont pas de programmes fermes de construction d'installations supplémentaires, si ce n'est les tranches actuellement en chantier en Finlande et en France. Le gouvernement britannique encourage la construction de tranches nucléaires, mais aucune commande ferme n'a été passée à ce jour. Plus récemment, le gouvernement italien nouvellement élu a manifesté de l'intérêt pour la construction de centrales nucléaires. Plusieurs pays d'Europe, à savoir l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne et la Suède prévoient au contraire de réduire fortement leur dépendance vis-à-vis de l'énergie nucléaire parce qu'ils ont adopté des politiques de sortie du nucléaire. Toutefois, dans plusieurs d'entre eux, l'opinion des politiques est partagée sur le nucléaire, et l'énergie nucléaire continuera encore longtemps de figurer dans le paysage énergétique puisque les dernières centrales devraient être mises à l'arrêt définitivement en 2022 en Allemagne et en 2025

Hypothèses adoptées par l'AEN

Scénario bas

La construction de centrales se réduit au remplacement des anciennes d'ici 2030 – la puissance installée reste identique ou augmente légèrement grâce aux prolongations de la durée de vie, aux augmentations de puissance et au remplacement des anciennes centrales par de plus puissantes.

De 2030 à 2050 :

- Les techniques de piégeage et de stockage du carbone sont un succès.
- Les énergies renouvelables sont un succès.
- Les nouvelles technologies nucléaires sont peu performantes.
- L'opinion publique et les politiques sont peu favorables à l'énergie nucléaire.

Scénario haut

Les prolongations de durée de vie et les augmentations de puissance se poursuivent. Les plans actuels et déclarations d'intention des autorités nationales prévoyant une augmentation de la puissance installée d'ici 2030 se concrétisent pour la plupart.

De 2030 à 2050 :

- Les techniques de piégeage et de stockage du carbone ne sont pas très concluantes.
- Les sources renouvelables ne produisent que des quantités faibles d'énergie.
- L'expérience des nouvelles technologies nucléaires est bonne.
- L'inquiétude du public au sujet du changement climatique et de la sécurité d'approvisionnement croît, rejaillissant fortement sur l'attitude des gouvernements.
- Le public et les décideurs acceptent bien l'énergie nucléaire.
- Les échanges de droits d'émission de carbone sont largement répandus et efficaces.

en Belgique et en Suède. L'énergie nucléaire est considérée sous un jour plus favorable dans les pays d'Europe de l'Est dont certains sont déterminés à augmenter leur puissance nucléaire installée.

D'après les plans actuels et déclarations d'intention d'autorités nationales, les pays qui auront la plus forte puissance installée en 2020 devraient être les États-Unis, la France, le Japon, la Fédération de Russie, la Chine et la Corée. C'est en Chine et aux États-Unis que les augmentations de la puissance installée les plus importantes sont prévues. Les pays qui produisent le plus d'électricité nucléaire dans le monde ne sont pas, à l'exception de la France, ceux qui en dépendent le plus. Parmi les cinq producteurs qui devraient arriver en tête en 2020, les États-Unis et la Chine ne compteront que 20 % et 5 % d'énergie nucléaire respectivement dans leur production d'électricité. Même si plusieurs pays aujourd'hui non nucléaires envisagent de rejoindre les pays ayant des centrales nucléaires, ils ne devraient faire progresser la puissance installée mondiale que de 5 % d'ici 2020.

L'AEN a établi des projections de l'offre d'électricité nucléaire dans des scénarios haut et bas, qui montrent que la puissance nucléaire installée dans le monde pourrait passer de 372 GWe en 2008 à 580-1 400 GWe en 2050. Dans le scénario haut, la part du nucléaire dans la production d'électricité mondiale, qui est de 16 % aujourd'hui, s'élèverait à

22 % en 2050. Ces projections concordent globalement avec celles d'autres organisations.

Pour parvenir à ce résultat, il faudrait mettre en service en moyenne entre 23 (scénario bas) et 54 (scénario haut) réacteurs par an entre 2030 et 2050 pour remplacer les centrales fermées et pour augmenter la production nucléaire. L'expérience passée montre que le monde est capable de construire des centrales nucléaires au rythme nécessaire pour atteindre les projections prévues dans le scénario haut de l'AEN sur la période allant jusqu'à 2050. Elle prouve également que, si les pays le désirent, on est en mesure de construire des centrales nucléaires suffisamment vite pour que d'ici 2030 la puissance nucléaire installée représente 30 % de la puissance mondiale, tandis que le scénario de référence de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) envisage une proportion de 10 % seulement.

Dans les deux scénarios de l'AEN, la production électronucléaire reste concentrée dans les pays de l'OCDE. Malgré la croissance économique rapide de l'Inde et de la Chine, leur contribution à la puissance nucléaire installée mondiale resterait relativement faible en 2050.

D'après les projections de l'AEN allant jusqu'en 2050, la production électronucléaire restera concentrée dans les pays de l'OCDE.

Rôle potentiel de l'énergie nucléaire pour atténuer les conséquences négatives de la croissance de la demande d'énergie mondiale

Conséquences sur le changement climatique

L'analyse du GIEC montre que les émissions annuelles de CO₂ doivent être divisées par deux par rapport aux niveaux de 2005 si l'on veut pouvoir maintenir à un niveau tolérable les conséquences du changement climatique. Ces émissions devront donc être ramenées à environ 13 Gt/an d'ici 2050. Or, d'après des évaluations, elles avoisineront 60 Gt/an en 2050 si l'on ne prend pas de mesures sérieuses pour améliorer la situation. Avec 27 % des émissions anthropiques mondiales de CO₂, la production d'électricité est de loin la source la plus importante de gaz à effet de serre. Elle est aussi celle qui augmente le plus vite. Sur un cycle de vie complet, l'énergie nucléaire ne produit pour ainsi dire pas de CO₂.

La production d'électricité est la source de gaz à effet de serre la plus importante et celle qui augmente le plus vite.

Selon l'AIE, il faudra associer diverses technologies pour parvenir à atteindre cet objectif très ambitieux, et notamment améliorer considérablement l'efficacité tant de la production que de la consommation d'énergie, développer massivement les énergies renouvelables, procéder au piégeage et au stockage d'importantes quantités de carbone et développer dans de très fortes proportions l'énergie nucléaire.

L'énergie nucléaire est la seule technologie ne produisant pas de carbone qui a fait ses preuves à l'échelle requise. Dans les scénarios bas et haut de l'AEN, la réduction des émissions de CO₂ pourraient atteindre 4 à 12 Gt/an en 2050 si le nucléaire remplaçait le charbon, un résultat intéressant compte tenu de l'objectif de 13 Gt/an que recommande le GIEC.

L'énergie nucléaire peut produire de l'électricité sans pour ainsi dire émettre de CO₂ – elle est la seule technologie mature disponible à l'échelle requise.

Appliqué à la production d'électricité, le concept des coûts externes désigne les conséquences qui n'apparaissent pas dans les prix, et notamment celles sur le changement climatique. Des évaluations incluant les coûts externes de la production d'électricité montrent que le nucléaire et l'hydraulique sont les modes de production les moins chers si l'on tient compte du cycle de vie intégral.

Toutefois, le Protocole de Kyoto n'accepte pas de compter l'énergie nucléaire parmi les technologies éligibles dans le cadre des mécanismes pour un développement propre et de mise en œuvre

conjointe. En outre, la durée d'application du protocole est trop courte pour avoir une influence significative sur les décisions d'investir dans des centrales électriques. Les négociations en vue d'une convention qui lui ferait suite ont commencé. Comme les centrales électriques représentent le secteur qui produit le plus de dioxyde de carbone et que leurs émissions augmentent plus vite que celles de tout autre secteur, la convention nouvelle qui sera adoptée devra porter sur une échéance à plus long terme et prendre en compte toutes les solutions possibles.

Conséquences en termes de sécurité énergétique

Plus que les énergies fossiles l'énergie nucléaire est capable de garantir la sécurité d'approvisionnement parce que le combustible consommé, l'uranium, provient de diverses sources et que les principaux fournisseurs sont des pays politiquement stables. En raison de la forte densité énergétique de l'uranium (une tonne d'uranium produit autant d'énergie que 10 000 à 16 000 tonnes de pétrole avec les techniques actuelles), les perturbations des transports n'ont pas de conséquence significative. De plus, associée à la faible part de l'uranium dans le coût de production de l'électricité, cette densité énergétique élevée permet de constituer sans problème d'importantes réserves énergétiques à des prix abordables.

Si les programmes nucléaires devaient se développer fortement dans le monde, la base de ressources identifiées aujourd'hui permettrait d'assurer l'approvisionnement des réacteurs pendant plusieurs milliers d'années, mais l'on aurait alors besoin de surgénérateurs rapides qui ne sont pas encore exploités à l'échelle industrielle.

Il existe suffisamment de ressources identifiées d'uranium pour que la puissance nucléaire installée mondiale puisse se développer jusqu'en 2050 au moins, au cas où l'on opérerait pour un cycle ouvert (sans retraitement), sachant qu'il reste quelques décennies pour découvrir de nouveaux gisements. Le ratio actuel des ressources à la consommation est meilleur que celui du gaz ou du pétrole. Les ressources supplémentaires que laissent entrevoir les données géologiques locales devraient garantir un approvisionnement en uranium de plusieurs centaines d'années.

Si l'on retire le combustible irradié existant, qui contient encore plus de la moitié de sa teneur

énergétique initiale, on pourrait disposer de combustible pendant 700 années-réacteur à supposer que les réacteurs soient des REO de 1 000 MWe ayant un coefficient de disponibilité de 80 %. Des ressources supplémentaires existantes, comme les stocks d'uranium appauvri, et l'uranium et le plutonium provenant du démantèlement des armes nucléaires, viendraient augmenter la disponibilité de combustible nucléaire de 3 100 années-réacteur.

La conversion de l'uranium non fissile en matière fissile dans des réacteurs surgénérateurs rapides en cycles fermés permettrait de multiplier par 60 la quantité d'énergie produite à partir de l'uranium. Avec cette technologie, on disposerait de combustible nucléaire pendant des milliers d'années, sachant que pour l'instant ces surgénérateurs ne sont pas encore exploités à l'échelle industrielle. La France, la Fédération de Russie, l'Inde et le Japon possèdent des réacteurs rapides en état de marche (dont certains sont des réacteurs de recherche).

Conséquences sanitaires

La consommation croissante d'énergie a des effets sanitaires importants. Les effets de la pollution atmosphérique sur la santé ne sont pas précisément connus, mais les *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030* les estiment aujourd'hui à 1 million de décès prématurés par an. L'énergie nucléaire pourrait contribuer à réduire les effets sur la santé de l'utilisation des combustibles fossiles.

Toute évaluation rationnelle des effets sanitaires des différentes technologies de production d'électricité doit intégrer tant les effets sanitaires à long terme des rejets éventuels de radioactivité lors d'accidents que les émissions résultant de l'exploitation de sources fossiles, qui sont de loin les plus importantes. Les émissions de gaz et de particules associées à la consommation de combustibles fossiles (SO₂, NO_x et particules fines) sont connues pour leurs effets délétères graves. L'analyse du cycle de vie des divers systèmes de production d'énergie électrique montre que l'énergie nucléaire (y compris les rejets de radioactivité) est l'un des moyens de production d'électricité les plus efficaces pour éviter les effets sanitaires liés aux émissions. Les pertes de vies humaines résultant des effets sanitaires des émissions toxiques dépassent largement celles dues aux accidents dans l'ensemble des chaînes d'approvisionnement énergétique.

Il ressort des comparaisons de courbes fréquence-conséquences établies d'après des statistiques sur les accidents survenus sur toute la chaîne de production d'énergie dans les pays membres de l'OCDE que, de 1969 à 2000, le nucléaire était très nettement plus sûr que le pétrole, le charbon et le gaz naturel qui eux-mêmes étaient bien plus sûrs que le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Toutefois, le public, comme les hommes politiques, se focalisent sur des accidents graves de très faible probabilité dont les rejets de radioactivité pourraient à long terme provoquer des morts.

Relever les défis de la croissance du nucléaire

Alors que l'énergie nucléaire est capable de diminuer les menaces environnementales et socio-économiques pour la planète, une bonne partie de l'opinion publique est convaincue que ses risques sont supérieurs à ses avantages. Si l'on veut pouvoir exploiter dans les années qui viennent tout le potentiel de l'énergie nucléaire, il faudra réussir à convaincre le public et les hommes politiques sur plusieurs aspects de la technologie et notamment la sûreté, le stockage des déchets et le démantèlement, la sécurité physique et la non-prolifération mais aussi les coûts.

Si l'on veut pouvoir exploiter tout le potentiel de l'énergie nucléaire, il faudra obtenir l'adhésion du public sur des sujets comme la sûreté, le stockage des déchets, la prolifération et les coûts.

Sûreté

L'industrie nucléaire doit maintenir la sûreté et la protection de l'environnement au premier rang de

ses priorités. Ce sont principalement les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl qui ont brisé l'essor rapide du nucléaire dans les années 70 et 80. Parallèlement, les prix des combustibles fossiles, qui étaient bas, faisaient que la construction de centrales nucléaires n'était plus rentable dans de nombreux pays. Malgré la flambée actuelle des prix des combustibles fossiles, un autre accident grave, qu'il se traduise ou non par le rejet de quantités importantes de radioactivité dans l'environnement, aurait des répercussions graves sur l'avenir du nucléaire.

La sûreté nucléaire est un enjeu à l'échelle planétaire puisqu'un accident grave dans un pays peut avoir des répercussions sur ses voisins. Bien que la responsabilité de la sûreté nucléaire appartienne à

Devant l'intérêt croissant manifesté pour la construction de centrales nucléaires et pour les filières de nouvelle génération, la communauté internationale a lancé des initiatives afin d'améliorer l'efficacité et l'efficience de la réglementation.

chaque pays, la communauté nucléaire internationale s'efforce d'harmoniser les pratiques nationales dans ce domaine par l'intermédiaire d'initiatives telles que le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP).

Ce Programme multinational d'évaluation des conceptions a été entrepris par dix pays avec le soutien de l'AEN afin de mettre au point des démarches innovantes destinées à tirer le meilleur parti des ressources et des savoirs des autorités de sûreté nationales à qui il reviendra d'examiner les nouvelles conceptions de centrales nucléaires. Il s'agit ainsi surtout d'établir des pratiques réglementaires et des réglementations de référence destinées à renforcer la sûreté des nouvelles filières de réacteurs. La convergence recherchée des pratiques réglementaires et des réglementations devrait faciliter la coopération entre autorités de sûreté, améliorer l'efficacité et l'efficacité de l'examen réglementaire des conceptions qui fait partie de la procédure d'autorisation mise en place par chaque pays.

De nouvelles conceptions de réacteurs sont équipées de systèmes à sûreté passive dont la fonction est de maintenir l'installation dans un état sûr, particulièrement lors d'un événement imprévu, sans nécessiter de commande active. Certaines conceptions avancées de réacteurs de plus petite taille, qui n'ont pas encore été construits, possèdent un système de refroidissement intégral, au sens où les générateurs de vapeur, le pressuriseur et les pompes sont tous logés à l'intérieur de la cuve sous pression du réacteur de façon à réduire la probabilité et les conséquences des accidents de perte de réfrigérant primaire.

Des pays ayant une expérience très limitée du nucléaire et de la réglementation de cette activité pourraient être amenés à développer cette technologie. La communauté internationale, et en particulier les pays constructeurs de centrales, aura le devoir de veiller à ce que ces « nouveaux » pays nucléaires adoptent des approches industrielles et réglementaires appropriées et mettent en place des procédures juridiques suffisamment solides.

Stockage des déchets et démantèlement

Les déchets de faible activité et les déchets de moyenne activité à vie courte représentent les volumes les plus importants, mais seulement une faible proportion de la radioactivité totale, de tous les déchets radioactifs. Les technologies de stockage de ces déchets sont au point, et la plupart des pays dotés de grands programmes électronucléaires exploitent des installations de stockage ou sont parvenus à un stade avancé de leur mise au point.

Les reports et échecs de certains grands programmes de stockage des déchets de haute activité

(DHA) continuent de ternir fortement l'image de l'énergie nucléaire. Les gouvernements et l'industrie nucléaire doivent travailler ensemble à la mise en place de systèmes de stockage sûrs. Comme aucun dépôt de déchets de haute activité n'a encore été aménagé, l'impression générale est que le stockage est techniquement très difficile, voire impossible. Par ailleurs, la gestion des déchets et le démantèlement sont parfois considérés comme hors de prix.

Les déchets de haute activité sont produits en faible quantité et peuvent être entreposés en toute sécurité sur de longues périodes. Un réacteur à eau ordinaire de 1 000 MWe produit environ 25 tonnes de combustible usé par an qui peuvent être conditionnées et stockées sous forme de DHA. En revanche, si l'on retire le combustible usé, ce sont 3 m³ de déchets de haute activité vitrifiés qui sont produits.

La solution sur laquelle s'accordent tous les spécialistes pour la gestion finale du combustible nucléaire usé et des déchets de haute activité est le stockage en formation géologique qui repose sur des bases technologiques bien établies. À ce jour, aucune installation de stockage de ces déchets n'a obtenu d'autorisation, mais des progrès sont accomplis sur cette voie, grâce à la démarche participative adoptée pour prendre les décisions. Aux États-Unis, un site a été sélectionné, et d'importants travaux de reconnaissance ont été effectués. En Finlande, le site choisi bénéficie du soutien des instances politiques et des populations locales, et il est possible que la Suède se trouve bientôt dans la même situation. Bon nombre d'autres pays, et notamment la France, le Japon et le Royaume-Uni sont actuellement à la recherche d'un site de dépôt de DHA acceptable. Si tous les pays qui étudient le stockage en formation géologique parviennent à exploiter un dépôt avant 2050, un quart seulement du combustible nucléaire usé et des déchets de haute activité produits dans le scénario haut de l'AEN restera alors sans voie de stockage définie.

Des installations nucléaires ont été démantelées avec succès, dont plusieurs centrales américaines d'une puissance supérieure à 100 MWe. Les déchets correspondants ont été stockés. Une analyse du Ministère du Commerce et de l'Industrie du Royaume-Uni démontre que les coûts de la gestion des déchets et du démantèlement des centrales nucléaires représentent 3 % seulement du coût total de la production nucléaire. Des schémas de

Le fait que l'on ne soit pas encore parvenu à construire des dépôts de déchets de haute activité contribue pour beaucoup à ternir l'image du nucléaire. Pourtant il existe un consensus international en faveur du stockage en formation géologique.

financement sont en place pour faire face aux charges financières du démantèlement.

On estime que les activités militaires durant la Guerre froide sont responsables de 70 % des charges liées au démantèlement des installations nucléaires dans le monde et non les centrales nucléaires civiles.

Non-prolifération et sécurité

Nombreux sont ceux qui redoutent que des matières ou technologies élaborées pour produire de l'électricité, donc pour des objectifs pacifiques, ne soient détournées à des fins militaires. Le système des garanties mis en place par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en application du Traité sur la

Le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires a effectivement limité la dissémination des armes nucléaires quarante années durant.

non-prolifération des armes nucléaires (TNP) a bien servi la communauté internationale dans la mesure où il a évité le détournement de matières et technologies nucléaires civiles à des fins militaires. Un total de 191 pays sont parties au TNP qui est entré en vigueur

en 1970. En 1995, il a été prorogé indéfiniment. Les accords de garantie sont complétés par des mesures diplomatiques, politiques et économiques et des contrôles des exportations de technologies sensibles.

Le TNP constitue le socle juridique sur lequel repose le régime international qui a permis d'éviter la dissémination des armes nucléaires pendant près de 40 ans. Pourtant, son efficacité et le soutien dont il jouit pourraient être compromis par diverses évolutions politiques, juridiques et techniques. Il aura donc besoin d'être renforcé pour continuer de produire des résultats aussi efficaces.

Soucieuse d'empêcher la dissémination des technologies de retraitement et d'enrichissement, l'AIEA a proposé des approches multilatérales destinées à réduire le risque de prolifération dans les activités du cycle du combustible nucléaire. Ces démarches visent à renforcer les contrats commerciaux d'enrichissement et de retraitement en vigueur en proposant un éventail de mécanismes tels que la mise en œuvre de garanties internationales d'approvisionnement en combustible nucléaire, des mesures pour favoriser la conversion volontaire d'installations nationales en installations multinationales, la création de nouvelles installations d'enrichissement et de stockage du combustible usé en partenariat multinational.

Plusieurs autres propositions sont également à l'étude ou en gestation. Le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), une initiative

des États-Unis qui comptait 21 pays participants en août 2008, est au nombre de ces propositions ainsi que le projet russe de création d'un centre international d'enrichissement de l'uranium. Des propositions émanant du Japon, de l'Allemagne et d'un groupe de six pays dotés d'usines d'enrichissement commercial sont également venues alimenter le débat international.

Le régime international des garanties est certes l'un des grands outils de la non-prolifération, mais il est possible également de faciliter, par la conception même des installations, le contrôle des garanties. Les technologies nucléaires avancées sont conçues de façon à offrir une meilleure résistance aux menaces de prolifération et une grande robustesse en cas de sabotage ou d'attentat terroriste.

Coûts et financement

Une comparaison des coûts actualisés de la production d'électricité dans les centrales nucléaires, au charbon et au gaz, effectuée en 2005 par l'AEN et l'AIE montre que l'énergie nucléaire concurrence le charbon et le gaz, de façon plus ou moins nette en fonction des circonstances locales. Depuis lors, le prix du pétrole a quadruplé (juin 2008), suivi par les prix des autres énergies fossiles. Il est économiquement viable de construire et d'exploiter des centrales nucléaires dans de nombreux cas. Toutefois, l'analyse de sensibilité des coûts de production de l'électricité nucléaire révèle que ces coûts sont particulièrement dépendants des coûts de construction directs et du coût du financement du capital. Les forts coûts amont des centrales nucléaires sont également un facteur dissuasif pour les investisseurs. Par conséquent, dans le cas de l'énergie nucléaire, les défis économiques sont davantage liés au financement de l'investissement qu'au coût actualisé de la production d'électricité.

Une comparaison internationale montre que le nucléaire concurrence le charbon et le gaz – mais les gouvernements devront peut-être veiller à atténuer les risques liés à la procédure d'autorisation et la planification pour encourager l'investissement.

Le coût de la production d'électricité nucléaire se décompose en trois parties : le coût en capital, les coûts d'exploitation et de maintenance et les coûts du cycle du combustible. L'investissement exigé pour construire une centrale nucléaire représente normalement 60 % du coût total de la production d'électricité nucléaire tandis que les coûts d'exploitation et de maintenance et les coûts du cycle du combustible s'élèvent respectivement à 25 et 15 %. Le coût de l'uranium lui-même avoisine 5 % seulement du coût de production de

l'électricité. On est donc loin de la structure des coûts de production dans des centrales thermiques à flamme, en particulier les centrales à gaz où les coûts du combustible sont prédominants.

L'apparition des marchés libéralisés de l'électricité s'est révélée globalement positive pour les centrales nucléaires. La concurrence a favorisé de meilleures performances, permettant ainsi de valoriser pleinement les actifs de production. Les augmentations de puissance, la prolongation de la durée de vie et une meilleure disponibilité permettent d'améliorer les performances économiques des centrales anciennes et nouvelles. Dans le monde entier, la disponibilité moyenne a progressé de près de 10 % au cours des 15 dernières années pour atteindre aujourd'hui 83 %. En 2006, elle dépassait 90 % en moyenne dans cinq pays et en 2007 dans six. Les réacteurs les plus performants du monde affichent des disponibilités voisines de 95 %. La puissance de bon nombre de centrales a été relevée, parfois de 20 %, et les réacteurs dont la durée de vie a été prolongée de 40 à 60 ans sont nombreux.

Les coûts en capital élevés des centrales nucléaires et la durée des processus d'autorisation ont incité les investisseurs à la plus grande prudence. Les gouvernements qui souhaitent encourager l'investissement dans le nucléaire devront peut-être faire en sorte d'éliminer ou du moins d'atténuer les risques financiers réels ou perçus qui sont associés à la procédure d'autorisation, à la planification ainsi qu'à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement. Il serait également utile, pour réduire les risques politiques auxquels sont exposés les investisseurs, de parvenir à un large consensus national sur le programme nucléaire.

Les gouvernements devront aussi parfois mettre en place des mécanismes transparents de longue durée pour fixer le prix du carbone et organiser des échanges de droits d'émission. Dans le cas de l'énergie nucléaire, la plupart des coûts externes sont déjà internalisés, tandis que, pour les combustibles fossiles, ces coûts sont presque aussi importants que les coûts directs. Les impôts auxquels sont soumises les compagnies d'électricité peuvent influencer sur la compétitivité relative des techniques de production et décourager la construction d'installations à forte intensité capitalistique, comme les installations nucléaires ou celles qui fonctionnent avec des énergies renouvelables. Les gouvernements devront donc s'assurer que la fiscalité appliquée sert bien les objectifs de leurs politiques énergétiques.

Régime juridique, infrastructure et ressources

Le régime juridique international actuel recouvre une série de traités, conventions, accords et résolutions

internationales juridiquement contraignants, auxquels viennent s'ajouter de nombreux codes, règles et normes qui n'ont aucune force exécutoire. Ce régime a subi d'importantes transformations au cours des 50 dernières années. Au niveau national comme international, les cadres juridiques doivent être suffisamment souples pour s'adapter à des évolutions futures, y compris à une forte progression de la production d'énergie nucléaire dans le monde. L'un des défis majeurs consistera à persuader les pays qui se lancent dans l'électronucléaire de respecter les dispositions du régime international actuellement en vigueur. Il en ira de même des pays qui sont déjà dotés de programmes électronucléaires mais qui ont jusqu'alors refusé d'harmoniser leur régime avec le régime international existant.

L'un des défis majeurs lié à l'essor du nucléaire consistera à persuader les pays qui se lancent dans l'électronucléaire de respecter les dispositions du régime légal international actuellement en vigueur.

Les autorités de sûreté nationales constituent des éléments majeurs des régimes juridiques nationaux auxquels il importera de conserver les attributs suivants :

- autorité juridique, compétences techniques et managériales satisfaisantes ;
- ressources humaines et financières suffisantes pour accomplir leur mission ;
- indépendance par rapport à toute influence ou pression qui pourrait aller à l'encontre de la sûreté.

Avec la hausse prévue de la demande d'électricité nucléaire, les parties intéressées pourraient exiger non seulement l'adoption d'une législation nationale plus complète et définitive mais des conventions internationales sur la participation du public qui soient plus efficaces. Il faudra continuer d'approfondir et de mettre en œuvre des principes de bonne gouvernance afin de former la société civile au processus qui mène à la décision et à la conception de l'avenir de l'énergie nucléaire et de l'y associer. Pour en garantir la réalisation concrète, on aura besoin d'un cadre juridique favorisant la transparence de l'information et la participation des intéressés. Les législateurs mettront très vraisemblablement en place des procédures juridiques pour permettre aux intéressés de prendre plus largement part au processus de décision. Ils sont d'ores et déjà convaincus que la participation de la société civile à la décision conduira à la mise en place de politiques nucléaires et environnementales plus efficaces et contribuera à gagner la confiance du public.

Bon nombre des travailleurs du secteur nucléaire actuellement en poste ont reçu leur formation et commencé leur carrière dans les années 60

et 70 à l'époque de l'essor rapide des programmes nucléaires. Ils sont aujourd'hui près de la retraite ou ont déjà quitté l'industrie. Le long cycle de vie des centrales nucléaires et les compétences techniques indispensables signifient que l'industrie nucléaire a aujourd'hui, dans de nombreux pays, des difficultés à préserver les compétences et savoir-faire et à former une nouvelle génération de personnel qualifié capable d'accompagner le déploiement du nucléaire.

À la suite du vieillissement des effectifs, du ralentissement des constructions de centrales et en raison du niveau d'expertise nécessaire, le secteur nucléaire connaît des problèmes de ressources humaines.

L'ouverture à la concurrence des marchés d'électricité, avec les pressions en faveur d'une baisse des coûts et la réduction des financements publics de la recherche nucléaire qu'elle entraîne, se répercute sur la disponibilité des ressources humaines. La plupart des pays sont aujourd'hui conscients de

la nécessité de trouver des ressources humaines qualifiées, et des initiatives internationales, régionales et nationales récentes visent à encourager et à faciliter l'inscription des étudiants dans les filières nucléaires. Des progrès ont été certes accomplis, mais il faut poursuivre l'effort.

La recherche nucléaire est primordiale dans un certain nombre de domaines dont la sûreté, la gestion des déchets radioactifs, les sciences nucléaires et pour le développement de technologies. Au cours des années 90, la plupart des gouvernements des pays de l'OCDE dotés de programmes électronucléaires ont diminué leurs financements de la R-D sur la fission nucléaire. Cette réduction des ressources nationales a renforcé l'importance des organisations internationales telles que l'AEN et l'AIEA en tant que lieux où mettre en commun les compétences et les ressources des laboratoires, industries et universités nationales. Ces organisations jouent en outre un rôle important dans toutes les activités liées à la préservation des savoirs.

Le petit nombre de centrales nucléaires construites dans le monde ces dernières années a provoqué une forte concentration des entreprises dans le secteur de la construction nucléaire, qui explique que la capacité de construction de nouvelles installations soit limitée. Cette capacité peut être rétablie, si la demande existe, et l'on perçoit déjà des signes d'une évolution dans ce sens.

L'énergie nucléaire et la société

Si l'électricité d'origine nucléaire produite est concurrentielle, les populations s'intéressent davantage à certains aspects périphériques (déchets radioactifs, terrorisme et prolifération) qu'au fonctionnement réel des centrales. L'opposition à l'énergie nucléaire

diminuerait considérablement avec la résolution du problème des sites de dépôts de déchets.

Toutefois, plus de la moitié des citoyens de l'Union européenne jugent que les risques que présente l'énergie nucléaire sont supérieurs à ses avantages : il s'agit en particulier de ceux qui estiment qu'ils ne sont pas bien informés ainsi que des citoyens de pays sans programme électronucléaire, qui ont donc peu d'expérience personnelle du nucléaire. Une meilleure connaissance de l'énergie nucléaire entraîne une opinion plus favorable, or la plupart des gens estiment qu'ils la connaissent mal. Pour l'information, les scientifiques et les ONG sont jugés les plus fiables. Les gouvernements nationaux, les producteurs d'énergie et les autorités de sûreté nucléaire jouissent d'une moindre confiance. Si l'on veut que l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.

Si l'on veut que l'énergie nucléaire se développe, il importera de plus en plus que s'instaure une relation régulière entre les décideurs, l'industrie nucléaire et la société, qui soit propice au développement des connaissances et à la participation du public.

Faire en sorte que les citoyens puissent acquérir une connaissance approfondie des questions nucléaires grâce à leur participation directe s'est révélée être une démarche très efficace. Et s'il est nécessaire de communiquer des informations pour mieux informer la société sur les risques nucléaires, acquérir la confiance du public doit être considéré comme tout aussi important. La communication doit se faire franchement et simplement, et doit l'emporter sur des exigences contradictoires telles que la sécurité et les pressions financières.

Développer la technologie

Réacteurs avancés

Font partie des réacteurs avancés, les réacteurs des générations III, III+ et IV. Environ 80 % des centrales nucléaires d'aujourd'hui utilisent des réacteurs à eau ordinaire (REO) de deuxième génération, construits pour la plupart dans les années 70 et 80. Les REO devraient continuer de dominer la production électronucléaire jusqu'au milieu du siècle. Toutefois, les futures centrales

nucléaires appartiendront à la génération III+. Quatre REO de génération III+ sont en service aujourd'hui et plusieurs autres en construction. Ces filières ont des caractéristiques de sûreté et des performances économiques meilleures que les réacteurs de deuxième génération actuellement exploités.

L'énergie nucléaire pourrait contribuer davantage à l'approvisionnement en électricité, mais aussi à la production de chaleur quasiment sans produire d'émissions de carbone. La chaleur nucléaire des REO est aujourd'hui utilisée pour deux applications : le chauffage urbain et le dessalement de l'eau de mer. La plupart des autres procédés industriels exigent des températures qui ne peuvent être atteintes que dans

les réacteurs à haute température à gaz (RHT). Ces réacteurs sont conçus pour produire de l'électricité dans une turbine à gaz et pour fonctionner à des températures adaptées à la production d'hydrogène et à d'autres applications de la chaleur de procédé. À l'échelle du globe, des investissements importants ont été consentis dans les études et recherches sur la production d'hydrogène dans des centrales nucléaires avec la volonté de réduire la dépendance par rap-

port au pétrole importé. L'exploitation commerciale est envisagée autour de 2020. La production d'hydrogène pourrait devenir par conséquent l'une des applications importantes de l'énergie nucléaire dans les décennies qui viennent.

La croissance projetée de la demande d'électricité interviendra surtout dans les pays en développement pour qui les grandes centrales nucléaires que mettent au point et construisent les pays avancés ne sont pas nécessairement adaptées. Les grandes centrales ne seront en effet pas toujours la solution optimale sauf pour fournir de l'électricité en base dans de grands pays comme la Chine et l'Inde. L'isolement géographique de certains centres de population les prédispose à se doter de réacteurs de petite ou moyenne puissance (RPMP), en particulier pour produire également de la chaleur et/ou de l'eau potable. Plusieurs concepts de réacteurs de petite et moyenne puissance de génération III et III+ sont à l'étude. La moitié d'entre eux, de par leur conception, n'exigent pas de rechargement sur site, cela afin de réduire les coûts en capital et d'améliorer la résistance à la prolifération de ces installations. Il s'agit principalement de REO à sûreté passive et intrinsèque qui sont dotés par exemple de circuits de refroidissement primaire

intégrés. Ces caractéristiques de conception sont particulièrement adaptées aux pays ayant une expérience limitée dans le domaine nucléaire. Toutefois, il faut savoir que ces technologies n'ont pas encore été exploitées à l'échelle industrielle.

Pour le plus long terme, les systèmes énergétiques de génération IV, c'est-à-dire reposant sur des concepts de réacteurs avancés, devraient être exploités à l'échelle industrielle après 2030. Aujourd'hui dans le monde un large éventail de concepts de réacteurs avancés sont à l'étude et, à l'évidence, il faudra compter beaucoup sur la coopération internationale si l'on veut tirer le meilleur parti possible des financements limités accordés à la recherche et au développement. Il importe de noter que les systèmes énergétiques de quatrième génération ont une résistance à la prolifération et une protection physique contre les menaces terroristes qui ont été renforcées. Le Forum international Génération IV a sélectionné pour des études et recherches approfondies six systèmes avec leurs cycles du combustible. Plusieurs d'entre eux sont des réacteurs rapides à cycles du combustible fermés. Trois initiatives internationales au moins ont été lancées pour favoriser le développement de technologies nucléaires qui allient fiabilité et rentabilité et produisent un minimum de déchets, cela dans des conditions à la fois sûres et durables et sans favoriser la prolifération.

- le Forum international Génération IV dont l'IAEA assure le Secrétariat technique ;
- le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP), entrepris à l'initiative des États-Unis ;
- le Projet international de l'IAEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible innovants (INPRO).

Au niveau de la recherche et du développement, on est parvenu à réaliser la fusion nucléaire contrôlée quelques secondes seulement. Cadarache, en France, a été sélectionné pour y installer le projet de réacteur thermonucléaire expérimental ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) qui marquera la prochaine grande étape de développement de cette technologie. C'est une technologie en soi beaucoup plus complexe que la fission, et dont les performances économiques sont très incertaines. La fusion ne devrait pas pouvoir être exploitée à l'échelle industrielle avant la deuxième partie du siècle au plus tôt.

L'énergie nucléaire pourrait contribuer davantage à produire de la chaleur tout autant que de l'électricité, quasiment sans émettre de carbone ; la production nucléaire d'hydrogène pour les transports pourrait devenir une application importante.

L'énergie de fusion, qui n'en est qu'au stade expérimental, ne devrait pas pouvoir être déployée pour produire de l'électricité à l'échelle industrielle avant la seconde moitié du siècle au moins.

Cycles du combustible avancés

À l'heure actuelle, les pays soit retraitent leur combustible nucléaire usé soit ont l'intention de le stocker directement dans un dépôt en formation géologique, une fois conditionné dans des colis adaptés. Sur les trois pays qui possèdent les plus grands parcs nucléaires, la France retraite son combustible et assure des services de retraitement commerciaux à d'autres pays, le Japon retraite son combustible et achète des services à l'étranger tout en développant sa propre capacité de retraitement, et les États-Unis ne retraitent pas leur combustible bien qu'ils en aient eu la capacité.

Les technologies de retraitement exploitées à l'échelle industrielle aujourd'hui permettent à la fois de récupérer l'uranium inutilisé et le plutonium afin de les réemployer dans des combustibles à

Les cycles du combustible avancés permettraient d'éliminer les isotopes à vie longue des déchets nucléaires.

oxydes mixtes destinés aux REO et aux futurs réacteurs rapides, et de réduire les volumes de déchets à stocker ultérieurement dans des dépôts en formation géologique. Toutefois, dans les années 90, les prix de l'uranium étaient si bas que le retraitement paraissait

économiquement moins intéressant. D'autre part, la séparation du plutonium posait le problème des risques potentiels de prolifération. Ces dernières années, le prix de l'uranium s'est redressé.

Plusieurs pays mettent au point des technologies avancées de retraitement qui font d'ailleurs l'objet de coopérations internationales dans le cadre du Forum international Génération IV et du Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP) mené par les États-Unis. Ces techniques devraient présenter plusieurs avantages. Les risques de prolifération peuvent être atténués en évitant de séparer le plutonium de l'uranium. La séparation des isotopes à vie longue du combustible usé (séparation poussée) afin de les réirradier ultérieurement permettra d'éliminer ces isotopes (transmutation). Ensuite, la radiotoxicité des déchets issus du traitement du combustible usé pourra diminuer par décroissance radioactive naturelle pour atteindre, en quelques centaines d'années seulement, un niveau inférieur à celui de l'uranium naturel qui aura servi à produire le combustible initialement. Avec ces techniques, le volume et la charge thermique des déchets à stocker dans les dépôts en formation géologique pourraient être énormément réduits, avec pour conséquence d'augmenter fortement la capacité de stockage des dépôts.

Il est également possible d'utiliser du thorium pour produire de l'énergie dans des réacteurs nucléaires. Il s'agit d'un élément dont l'abondance

dans la croûte terrestre est supérieure à celle de l'uranium. L'isotope du thorium que l'on rencontre dans la nature peut être transmuté en un isotope fissile de l'uranium. Plusieurs pays ont consacré des études et recherches aux cycles du combustible thorium, mais la technologie n'a pas encore atteint le stade de l'exploitation industrielle. ■

La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire

M. Taylor*

L'industrie nucléaire fournit un large éventail d'équipements et de services spécialisés pour soutenir la construction et l'exploitation de centrales nucléaires. Cela comprend la fourniture des centrales elles-mêmes, la gamme des matières et services requis dans le cycle du combustible, et les services et équipements nécessaires à la maintenance et à la rénovation. Les marchés correspondants ont considérablement évolué, depuis les tout débuts de l'industrie nucléaire, encadrés par les pouvoirs publics, pour devenir aujourd'hui des marchés commerciaux essentiellement concurrentiels.

Depuis les années 1980 et jusqu'à une période récente, l'industrie nucléaire a connu d'importants regroupements et mesures d'économie face à une demande généralement faible, ce qui a conduit à l'apparition d'un petit nombre de grands acteurs mondiaux dans certains secteurs. Ceci est en partie lié à des aspects particuliers de l'industrie nucléaire, mais aussi à la tendance plus générale à la mondialisation des principales activités industrielles. Parallèlement, la libéralisation des marchés de l'électricité dans nombre de pays de l'OCDE a changé l'environnement économique des propriétaires/exploitants de centrales. Les compagnies d'électricité ont été confrontées à une concurrence accrue, les contraignant à améliorer leurs performances et à faire plus attention aux coûts.

Une récente étude de l'AEN concernant *La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire*¹ a entrepris d'examiner les performances des grands secteurs de cette industrie dans les conditions actuelles du marché et, avec l'expansion du nucléaire attendue dans les prochaines années, comment ces marchés devraient évoluer face à une

relance notable de la demande. Cette étude a également analysé les implications possibles des assurances multilatérales de fourniture de combustible, proposées par plusieurs gouvernements, sur la concurrence commerciale.

L'étude fait apparaître que dans certains domaines de l'activité nucléaire, la concurrence est forcément limitée ou même absente. C'est le cas de nombreuses activités de recherche et développement, notamment celles qui poursuivent des objectifs à long terme, et pour lesquelles la coopération internationale et des aides publiques sont nécessaires avant que de nouvelles technologies puissent passer au stade de la commercialisation. Par ailleurs, au sein des secteurs commerciaux existants, certaines limitations existent forcément, en particulier en ce qui concerne les contrôles de non-prolifération des matières, équipements et technologies sensibles.

L'énergie nucléaire exige par ailleurs des investissements très importants dans des centrales et des équipements complexes, et requiert un haut niveau de connaissances spécialisées. Cela se traduit souvent par des relations à long terme entre les fournisseurs et les clients, qui travaillent ensemble pour faire en sorte que les centrales fonctionnent de manière sûre et efficace, et que les améliorations voulues puissent être menées à bien. L'étude observe que, sur les marchés de l'énergie nucléaire, la qualité et la fiabilité sont souvent au moins aussi importantes pour les clients que les prix.

Évaluation de la compétitivité des marchés

En l'absence de données statistiques détaillées pour chaque secteur du marché, il a été décidé de prendre en compte un ensemble de caractéristiques commerciales pouvant faire office d'indicateurs de compétitivité. Même si l'évaluation de chaque

* M. Martin Taylor (martin.taylor@oecd.org) travaille dans la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN.

indicateur comportait un certain degré de subjectivité, pris tous ensemble, ils ont fourni une impression globale intéressante sur l'efficacité de la concurrence dans chaque secteur. Ces indicateurs sont les suivants :

- parts de marché des principaux acteurs,
- degré d'intégration verticale,
- proportion de contrats à long terme,
- obstacles aux nouveaux entrants,
- coûts de transaction et segmentation du marché,
- différenciation des produits,
- équilibre entre capacité et demande,
- alliances sur le marché et coopération entre fournisseurs,
- aspects de biens publics,
- obstacles et restrictions aux échanges.

Lorsque c'était possible, les parts de marché ont été utilisées pour calculer l'indice Herfindahl-Hirschman (HHI) du segment de marché concerné. Cet indice est défini comme la somme des carrés du pourcentage des parts du marché détenues par tous les acteurs. Lorsqu'il est supérieur à 1 800, cela est souvent considéré comme le signe d'un marché ayant une concentration beaucoup trop élevée.

Principaux résultats pour chacun des principaux secteurs de marché

Conception, ingénierie et construction de centrales nucléaires

Ce secteur semble prêt à une grande expansion dans la décennie à venir et au-delà. Malgré la dépression prolongée du marché depuis les années 1980 et le regroupement qui en a résulté, les constructeurs de centrales nucléaires restants ont continué à mettre au point leurs propres modèles et proposent désormais des produits considérablement améliorés. Sur les principaux marchés tout au moins, où une série de commandes est possible, il devrait y avoir une forte concurrence entre quatre ou cinq constructeurs. Malgré quelques distorsions, un marché mondial composé de plusieurs constructeurs indépendants et concurrents est apparu, qui donne un réel choix de fournisseurs aux clients potentiels. Cela étant, les exigences réglementaires différentes suivant les pays pour les divers modèles de centrales nucléaires, qui peuvent entraîner des coûts initiaux considérables pour les constructeurs, sont susceptibles de limiter de fait les choix possibles, en particulier sur les petits marchés. À plus long terme, on devrait voir apparaître de nouveaux constructeurs importants, notamment en Corée et en Chine.

Fourniture d'uranium

Un nombre important de nouvelles usines de production d'uranium devraient entrer en service au cours des années à venir pour répondre à la demande croissante. Nombre d'entre elles seront détenues

par de nouveaux entrants ou de petits producteurs en expansion. Même si un certain regroupement est probable, la tendance devrait être à la réduction de la concentration du marché. Cela étant, la possibilité d'une fusion entre deux des principaux producteurs pourrait s'avérer préoccupante si l'entreprise issue de la fusion contrôlait une part très importante de la production mondiale. Les restrictions appliquées aux échanges concernant les importations d'uranium vers les États-Unis et l'Union européenne depuis le début des années 1990 ont affecté la concurrence sur les marchés. L'accroissement de la demande et la diminution des réserves existantes pourraient toutefois limiter les incidences concrètes de ces restrictions sur le marché, même si ces dernières restaient elles-mêmes en vigueur.

Services de conversion du concentré d'uranium en UF₆

Dans le monde, il n'existe en fait que trois grands prestataires de services de conversion en UF₆, auxquels vient s'ajouter un quatrième, mais qui se limite pour l'essentiel à proposer une offre globale comprenant la conversion et l'enrichissement. Du point de vue de la concurrence, cela laisse supposer que le marché est plus concentré qu'il ne serait souhaitable. Cela étant, le fait que les installations de conversion jouent le rôle de centres de stockage et d'échange du marché de l'uranium peut signifier que cela est plus commode pour les acteurs du marché si le nombre de sites est relativement limité. Parallèlement au fait que la conversion ne représente qu'une petite fraction (environ 5 %) du coût total du combustible nucléaire, cela signifie que les nouvelles installations de conversion peuvent avoir des difficultés à s'implanter sur de nouveaux sites. Les plans actuels de développement des capacités donnent à penser que les grands fournisseurs existants augmenteront leur capacité en fonction de la demande et qu'il ne faut pas s'attendre à voir évoluer le degré de concentration du marché.

Services d'enrichissement de l'uranium

La technologie d'enrichissement est l'une des plus sensibles du point de vue de la non-prolifération, ce qui veut dire qu'un nombre limité de pays seulement la possède et qu'elle est confiée par les pouvoirs publics seulement à un petit nombre d'exploitants commerciaux, ce qui limite inévitablement la concurrence sur le marché dans ce secteur. Cela étant, l'industrie de l'enrichissement connaît actuellement de grandes évolutions qui vont la transformer au cours des dix années à venir et au-delà. Les anciennes usines d'enrichissement par diffusion gazeuse qui existent encore en France et aux États-Unis seront remplacées par de nouvelles usines d'enrichissement par ultracentrifugation, et il y a également une possibilité pour que la technologie d'enrichissement par laser soit commercialisée. Les États-Unis compteront au moins deux, et peut-être

même quatre nouvelles usines d'enrichissement d'ici 2015, toutes exploitées de façon indépendante par des fournisseurs concurrents. La grande capacité d'enrichissement en Russie devrait également jouer un rôle croissant sur le marché international. Ces évolutions devraient conduire à une redistribution des parts de marché entre les fournisseurs existants.

Services de fabrication de combustible

Contrairement à d'autres services du cycle du combustible, la fabrication de combustible est principalement un service sur commande consistant à préparer des assemblages de combustible conformes aux spécifications exactes de chaque centrale. Dans une nouvelle centrale, le combustible est tout d'abord fourni par le constructeur de la centrale. C'est seulement plus tard dans la vie de la centrale que s'offre la possibilité de choisir entre des fournisseurs concurrents. De plus, certains exploitants de centrales nucléaires peuvent ne pas estimer que les risques liés au changement de fournisseur se justifient au regard des économies possibles sur les coûts en combustible. Néanmoins, une concurrence notable existe bien sur le marché de la fabrication du combustible, et pour les modèles de centrales nucléaires les plus courants, on peut avoir le choix entre jusqu'à trois fabricants de combustible. Cela étant, le marché de la fabrication du combustible a connu un regroupement ces toutes dernières années, avec la fusion des principaux constructeurs de centrales nucléaires. Il s'avère aujourd'hui que la concentration du marché de la fabrication de combustible est plus importante qu'il ne serait souhaitable. Dans certains sous-secteurs de ce marché, il n'y a en fait aucune concurrence.

Aval du cycle du combustible nucléaire

Une grande partie du petit nombre d'usines de retraitement de combustible usé est dédiée au traitement des sources domestiques de combustible usé, mais certaines retraitent le combustible usé d'autres pays sous contrat avec des compagnies étrangères. Il existe ainsi bel et bien un marché international restreint. Dans la perspective d'une extension future notable de l'énergie nucléaire, la possibilité de retraiter et de recycler le combustible usé suscite un regain d'intérêt. Cependant, la technologie de retraitement est extrêmement sensible du point de vue de la non-prolifération et il est probable qu'elle soit réservée à un petit nombre de pays, ou fasse l'objet d'un contrôle multilatéral. Il est par ailleurs probable que l'extension de son utilisation dépende de l'adoption de modèles de réacteurs avancés permettant de tirer pleinement profit des matières recyclées. Or, la commercialisation de tels modèles n'est attendue que bien après 2020.

En général, les compagnies d'électricité restent responsables de la gestion des déchets radioactifs produits dans leurs centrales, tout au moins jusqu'à

ce qu'ils soient transférés vers une autorité ou une agence nationale chargée du stockage. Une situation similaire existe pour le démantèlement des installations mises hors service et les déchets générés au cours de ce type d'activités. Aussi, l'activité commerciale dans ces secteurs est-elle le plus souvent limitée à la fourniture de services, de technologies et d'équipements. Beaucoup d'entreprises spécialisées sont mises à contribution, ainsi qu'un grand nombre des grandes compagnies de l'industrie nucléaire. Dans l'ensemble, il y a considérablement de concurrence et d'innovation dans la fourniture de services, de technologies et d'équipements destinés à la gestion des déchets radioactifs et au démantèlement.

Services de maintenance et de rénovation des centrales nucléaires existantes

Avec le manque de commandes de nouvelles centrales nucléaires ces dernières années, les constructeurs de réacteurs et autres sociétés d'ingénierie nucléaire ont été de plus en plus tributaires d'activités de maintenance, de conversion et de rénovation des parcs de centrales existantes. Avec les extensions de durée de vie désormais prévues pour un grand nombre de centrales, la demande concernant les grands projets de rénovation devrait rester élevée. Actuellement, il semble qu'il y ait un bon équilibre entre la capacité et la demande dans ce secteur, et un bon niveau de concurrence dans la plupart des sous-secteurs. Cela étant, si l'on assistait à une augmentation notable des commandes de nouvelles centrales nucléaires dans les années à venir, cette situation pourrait évoluer, car la construction de nouvelles centrales mobilisera souvent les mêmes entreprises. Il pourrait devenir plus difficile de trouver des fournisseurs concurrents capables d'assurer des tâches de maintenance de routine et de plus grands projets de rénovation dans les meilleurs délais.

Évaluation globale et conclusions

L'analyse réalisée dans le cadre de l'étude² montre que les secteurs du marché de l'industrie nucléaire connaissant la plus grande concentration sont l'enrichissement et la fabrication de combustible, avec dans chaque cas un fournisseur détenant plus de 30 % du marché et de 20 à 30 % en moyenne pour les autres. La concentration est forte également dans le secteur du retraitement, bien que ce soit un marché plus petit et moins bien développé. En ce qui concerne l'amont du cycle du combustible, il n'y a généralement pas de secteur où une seule et même entreprise soit très largement dominante, et chacun d'eux compte au moins quatre fournisseurs concurrents. À partir des informations actuellement disponibles, rien ne permet de croire que les parts de marché des principaux fournisseurs augmenteraient de manière significative si les secteurs concernés connaissaient une expansion au cours

des dix prochaines années. De fait, dans certains secteurs, comme celui de la fourniture d'uranium, il s'avère que la concentration du marché pourrait diminuer au cours des prochaines années.

Concernant le marché des nouvelles centrales nucléaires, il est difficile d'estimer la future répartition des parts de marché, car cela dépendra de la capacité de chacun des constructeurs à obtenir des commandes. Cela étant, dans la plupart des régions, on assiste à une concurrence marquée entre au moins trois ou quatre fournisseurs. À cet égard, le marché des centrales nucléaires soutient avantagement la comparaison avec certaines autres industries liées à l'ingénierie ayant des produits complexes de haute technologie, comme l'industrie aéronautique. Selon les premières indications, chacun des principaux constructeurs de centrales nucléaires remportera un nombre important de nouvelles commandes au cours des dix prochaines années. À l'avenir, le marché des services de fabrication du combustible sera en grande partie également déterminé par le marché des nouvelles centrales nucléaires.

Plusieurs grandes compagnies nucléaires détiennent une partie importante de plus d'un secteur, ce qui signifie qu'il existe un certain degré d'intégration verticale entre plusieurs secteurs du marché. Ces compagnies fournissant des équipements, des services et des matières nucléaires dans le cadre d'une offre globale, cela peut conduire à une diminution de la concurrence dans certains secteurs. Des accords aussi complets sont encore rares, mais à l'avenir certains clients pourraient préférer la sécurité supposée accompagner une offre complète de services par un seul et même grand fournisseur. Si certains clients préfèrent une fourniture globale, il est probable qu'un nombre croissant de compagnies essaieront de prendre les dispositions voulues pour satisfaire cette exigence.

Dans sa conclusion, l'étude présente ses principaux enseignements et recommandations :

- ⇒ L'existence de marchés concurrentiels pour la fourniture de biens et de services en matière de construction, d'exploitation et d'alimentation en combustible des centrales nucléaires est importante pour assurer la compétitivité globale de l'énergie nucléaire, et contribuer ainsi à diffuser plus largement ses avantages. Les pouvoirs publics doivent encourager et soutenir la concurrence sur ces marchés, et s'efforcer de prévenir les abus de position dominante.
- ⇒ Un important objectif de certains programmes nucléaires nationaux est de doter le pays concerné d'une capacité de production d'énergie nucléaire. Pour ce faire, il peut forcément s'avérer nécessaire de protéger quelque peu les industries naissantes et d'axer les investissements à l'échelon national sur un fournisseur unique, afin d'éviter les doubles emplois. Pour autant, il faut veiller à ne pas écarter de manière permanente les pressions

concurrentielles et les laisser se renforcer lorsque les secteurs commerciaux et industriels parviennent à maturité.

- ⇒ Si le développement et la démonstration à long terme de nouvelles technologies nucléaires peuvent nécessiter le soutien et le financement des pouvoirs publics, la concurrence est une très bonne incitation à l'innovation et au développement technologique, et contribue à améliorer les produits et services existants. Au fur et à mesure que les technologies naissantes parviennent à maturité et atteignent le stade de l'exploitation commerciale, elles devraient être de plus en plus soumises aux pressions concurrentielles, qui leur permettront de porter pleinement leurs fruits.
- ⇒ Des contrôles de non-prolifération rigoureux sur les matières et technologies nucléaires sensibles sont essentiels si l'on veut que les marchés mondiaux dans le domaine nucléaire soient ouverts et concurrentiels. Même si ces contrôles entraîneront forcément certaines restrictions et limitations du marché, ils sont compatibles malgré tout avec la création de nouvelles capacités par des fournisseurs concurrents, en vue de répondre aux exigences croissantes des programmes nucléaires partout dans le monde.
- ⇒ Les droits de douane et autres restrictions sur les échanges internationaux de biens et services destinés aux centrales nucléaires peuvent inutilement alourdir les coûts de l'énergie nucléaire. Les pouvoirs publics devraient s'efforcer de les supprimer ou de les réduire dans la mesure du possible.
- ⇒ Le meilleur moyen de garantir la fourniture de combustible nucléaire et des autres biens et services indispensables aux centrales nucléaires est de disposer d'un échantillon géographiquement diversifié de fournisseurs indépendants intervenant dans le cadre d'accords commerciaux sur tous les secteurs du marché. Les pouvoirs publics devraient s'efforcer de mettre en place les cadres juridiques et réglementaires qui permettent à une telle configuration de s'instaurer. Par ailleurs, l'harmonisation de ces cadres entre les différents pays, notamment en ce qui concerne la certification de nouveaux modèles de centrales nucléaires, élargirait les choix possibles pour les clients et renforcerait la concurrence sur les marchés du nucléaire. ■

1. AEN (2008), *La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire*, OCDE, Paris. Commande en ligne à : www.oecdbookshop.org.
2. Un tableau des principaux fournisseurs dans les différents secteurs de l'industrie nucléaire répartis en fonction de leur part de marché est disponible en ligne à : www.nea.fr/html/pub/newsletter/2008/fr/tableauVol26.pdf.

Défis pour la science des matériaux

M. Defranceschi*

La mise au point de réacteurs innovants à fusion thermonucléaire et à fission nucléaire est subordonnée à la disponibilité de combustibles nucléaires et de systèmes de matériaux fonctionnels et structurels avancés capables de résister à des conditions extrêmes : températures élevées, irradiation neutronique intense, environnements fortement corrosifs, combinés à des états de chargement et des historiques de chargements cycliques complexes. Les défis qu'il faudra relever dans le domaine des matériaux nucléaires sont légion : exploitation dans des conditions critiques, exigences de sûreté et de protection extrêmement élevées, sans oublier les problèmes liés au déclassement et au démantèlement des installations nucléaires ainsi qu'au traitement des déchets.

L'industrie nucléaire accorde une place primordiale à la recherche de nouveaux matériaux et à leur adaptation aux propriétés multifonctionnelles recherchées – ce que font également bon nombre d'industries – mais elle doit tenir compte d'une condition particulière : les rayonnements. Bien peu d'industries désirant se développer peuvent se dispenser de recherches en sciences des matériaux, mais aucune ne doit probablement y consacrer autant de moyens que l'industrie nucléaire. Par delà les questions scientifiques et technologiques fondamentales se posent des problèmes économiques et sociétaux : il est d'autant plus vital de contrôler le vieillissement des matériaux que la durée de vie des centrales nucléaires s'allonge et que les exigences de sûreté deviennent plus sévères.

Pour ce qui concerne les conditions d'exploitation, la complexité tient à la coexistence, assez rare, de contraintes de fonctionnement très sévères et d'une exigence, extrêmement difficile à satisfaire : prévoir correctement le comportement des matériaux sur le long terme dans un environnement où

les rayonnements, les chargements thermomécaniques et les agressions chimiques s'associent pour les dégrader. À maints égards, notre connaissance des matériaux reste empirique et difficile à extrapoler à de nouveaux matériaux, environnements ou conditions de fonctionnement car les mécanismes fondamentaux qui président à la fabrication et déterminent le comportement et les performances des matériaux restent en grande partie mal compris et nécessitent des recherches approfondies.

Le domaine en question, souvent désigné sous le nom de « matériaux nucléaires » par commodité, recouvre un vaste ensemble de matériaux de différents types (métaux et leurs alliages, polymères, verres, céramiques, etc.) susceptibles d'être employés dans des applications diverses.

Fission : acier ferritique (cuves sous pression des réacteurs), acier inoxydable austénitique (internes), alliages de zirconium (gainage des combustibles), matrices oxydes (combustibles usés).

Fusion : aciers ferritiques et austénitiques (paroi et tuyauterie), composites à base de céramiques.

Réacteurs de quatrième génération : alliages fer-chrome, carbure de silicium, etc.

Conditionnement des déchets : verres, matériaux à base de ciment, matrices minérales.

Composants de centrales nucléaires : polymères (câbles et revêtements).

Besoins technologiques

Les besoins technologiques en matériaux nucléaires sont très divers, et les sujets pluridisciplinaires abondent. Cette diversité concerne les types de matériaux, leurs propriétés ainsi que les échelles de grandeur et de temps. Il existe des différences majeures entre les sciences des matériaux, d'une part et les sciences de la matière condensée et la physique de l'état solide, de l'autre, qui tiennent aux motivations technologiques fondamentales de la première : l'adéquation à certains besoins (propriétés intrinsèques comme les modules ou la capacité de résister à de fortes températures), le comportement

* Mme Mireille Defranceschi (mireille.defranceschi@oecd.org) travaille à la Banque de données de l'AEN.

sur le cycle de vie (évolution du combustible nucléaire lors de son utilisation, évolution des matériaux fluant à haute température, claquage des polymères soumis à une contrainte électrique, altération des verres après stockage, par exemple), l'acceptabilité pour le client, les aspects liés à la sûreté ainsi que les aspects économiques et environnementaux (optimisation des matériaux destinés au stockage des déchets radioactifs, prolongation de la durée de vie en service).

Les spécialistes des sciences des matériaux se heurtent à de nombreuses difficultés :

- Les sciences des matériaux nucléaires étudient des problèmes multi-composants, multi-phase et multi-échelle. Les phénomènes peuvent aussi bien être observés à l'échelle atomique que macroscopique ou encore mésoscopique (de quelques nanomètres à un micron, environ), et l'on peut rencontrer simultanément plusieurs de ces échelles. L'échelle de temps peut aller de quelques femtosecondes à des dizaines d'années (durée de vie d'une cuve) quand il ne s'agit pas d'échelles de temps géologiques (stockage des déchets radioactifs).
- Les phénomènes fondamentaux qui régissent le comportement des matériaux sous irradiation sont complexes. À l'heure actuelle, on ne sait toujours pas quelle est l'échelle adaptée à ce phénomène. S'agit-il de l'échelle atomique (structure électronique) ou l'effet est-il collectif et se produit-il à plus grande échelle ? Il est également essentiel d'évaluer les propriétés physicochimiques du combustible nucléaire. Malheureusement, dans ce domaine, on dispose de données limitées en raison des difficultés posées par les champs de rayonnements intenses.
- De nombreux systèmes sont produits ou utilisés alors qu'ils ne sont ni en équilibre thermodynamique, ni homogènes : les considérer à l'équilibre est insuffisant. Par exemple, on admet, sans trop de risque d'erreur, qu'à de fortes températures, la plupart des solides sont en équilibre thermodynamique. À basse température, ce postulat n'est pas toujours vrai étant donné que les échelles de temps de la relaxation de ces solides peuvent être très longues. Un système peut également être maintenu dans un état qui n'est pas l'équilibre. L'irradiation des matériaux par des faisceaux d'ions ou de neutrons peut aussi placer le système dans une configuration complexe. Parfois, la perturbation du système est telle que des transitions de phases ordre-désordre provoquées par l'irradiation se produisent dans les alliages. Des transitions de phases induites par l'irradiation peuvent également s'observer dans des oxydes simples comme le dioxyde de zirconium, lorsque le solide passe d'une structure cristalline à une autre. Mais des transitions dues à l'irradiation peuvent aussi avoir lieu dans des

oxydes plus complexes. À l'heure actuelle, on ne comprend pas encore les mécanismes conduisant à ce type de transitions de phases sous irradiation.

- La connaissance des grandeurs thermodynamiques est essentielle pour étudier la stabilité et/ou la réactivité chimique des phases solides. Or, ces grandeurs ne sont pas toujours connues, au niveau théorique ou expérimental.
- Il est primordial de déterminer les types de contraintes (fatigue, corrosion, fluage thermique, etc.) mais, d'une manière plus générale, parce que tous les systèmes couplés sont en interaction et subissent au surplus une combinaison de différentes formes de contraintes, des recherches interdisciplinaires s'imposent.

Dans ce contexte, la R-D est un complément indispensable si l'on veut pouvoir mener des études communes et comparatives pour soutenir la mise au point de différentes catégories de combustibles innovants (et de matériaux de gainage). Elle permet de procéder à une étude multi-échelle des combustibles et matériaux de structure pour les systèmes nucléaires et d'analyser les aspects scientifiques et technologiques des matériaux nucléaires. La R&D vise plus particulièrement à établir des modèles et simulations multi-échelles qui serviront d'outils de prévision validés pour la conception de systèmes nucléaires, la fabrication et le fonctionnement des combustibles. Elle constitue un formidable moyen de favoriser des échanges d'informations sur les modèles et les simulations de matériaux nucléaires, les méthodes théoriques et les méthodes de calcul, la validation expérimentale et d'autres sujets connexes. Elle produit en outre des informations à jour, des données partagées, des modèles et une expertise. À cet égard, il convient de rechercher la combinaison optimale de recherche expérimentale et de recherche théorique pour explorer de nombreux champs de recherche, de façon à bénéficier de l'apport réciproque des deux approches.

Effort de recherche

De nombreux goulets d'étranglement persistent et nécessitent un effort de recherche particulier. Deux exemples illustrent les aspects spécifiques et génériques des problèmes posés par les matériaux nucléaires. Le développement de modèles numériques témoigne de l'importance de la contribution de la R-D nucléaire aux sciences des matériaux, puisqu'elle est axée sur les rayonnements, leurs modes d'action et leur impact sur les propriétés d'utilisation des matériaux. Le second exemple illustre non seulement les aspects spécifiques mais aussi le caractère générique des difficultés à résoudre, au travers de problèmes liés aux conditions opératoires et de questions en aval concernant les propriétés thermodynamiques des matériaux.

L'étude expérimentale des effets de l'irradiation sur les matériaux est très coûteuse car elle nécessite l'utilisation d'installations expérimentales spécifiques (centrales nucléaires expérimentales, laboratoires de haute activité), qui sont relativement peu nombreuses. D'où les efforts importants réalisés pour mettre au point des outils numériques destinés à modéliser les effets de l'irradiation sur les matériaux nucléaires. Il est primordial d'identifier des aspects fondamentaux analysables par la modélisation ou la simulation avant de passer aux expériences si l'on veut gagner du temps et économiser les ressources nécessaires à la conception de nouveaux combustibles et matériaux de structure. Par exemple, la modélisation a pour fonction de décrire la thermodynamique des défauts ponctuels et des phases induites par irradiation. L'un des principaux objectifs de la modélisation est d'établir un ensemble d'outils cohérent auquel il sera ensuite facile d'intégrer tout modèle physique destiné à résoudre un problème de matériau multi-échelle. Le cadre étudié inclut les éléments suivants, mais ne s'y limite pas :

- modélisation et simulation atomistiques de combustibles nucléaires et matériaux de structure sur des échelles de temps et de grandeur de plus en plus importantes, en prêtant attention aux effets des dommages d'irradiation et aux méthodologies nécessaires à l'intégration des différentes échelles ;
- validation de simulations et de prévisions de modèles via le benchmarking et identification des données expérimentales qui seraient les plus urgentes ou les plus importantes pour cette validation ;
- instauration et maintien d'une synergie entre pratiques employées pour les expériences et les tests ; constitution de jeux et de bases de données de référence sur les expériences et les simulations, afin de mieux maîtriser l'emploi combiné des techniques de modélisation/simulation et des techniques expérimentales ;
- développement de nouveaux outils de mathématiques appliquées et outils logiciels (méthodes de stockage des données et méthodes algorithmiques innovantes, par exemple), en particulier s'ils concernent à la fois les combustibles et les matériaux de structure ;
- intégration des résultats des modélisations et simulations multi-échelles à des codes de performance et à des processus de qualification des matériaux, mais aussi à des environnements multiphysiques (couplage des changements des propriétés des matériaux et de la neutronique, par exemple).

D'un point de vue plus pratique, il est important de déterminer des diagrammes précis décrivant l'état à l'équilibre des matériaux constitués de plusieurs composants. Les logiciels spécialisés sont

sans conteste d'une grande utilité pour calculer des diagrammes acceptables de ce genre et établir des bases de données thermodynamiques très complètes. Le soin avec lequel sont choisies les données d'entrée (structures et valeurs sélectionnées) et analysés les résultats est primordial. Malheureusement, en raison des difficultés évoquées précédemment, on dispose rarement de grandeurs dont la qualité soit garantie. En outre, sachant que les conditions d'exploitation dans la cuve des réacteurs de quatrième génération devraient être encore plus contraignantes, on aura d'autant plus besoin de données thermodynamiques de qualité. Une évaluation détaillée des grandeurs thermodynamiques de toutes les phases des systèmes de combustible complexes doit être effectuée afin de prévoir le comportement des matériaux (compatibilité chimique, par exemple) à des températures situées entre 1 000 et 2 000°C. Ces connaissances peuvent également aider à définir les conditions de fabrication des matières combustibles.

Les produits de fission et les actinides mineurs doivent eux aussi être pris en compte dans les prévisions du comportement physico-chimique des combustibles irradiés dans des conditions normales et accidentelles. S'agissant des accidents graves, une base de données thermodynamiques constitue un outil précieux pour interpréter les expériences futures de relâchement de produits de fission et permet également de prévoir la température de liquéfaction. Pour les matériaux destinés à des applications nucléaires, il convient de souligner que les bases de données ne doivent pas contenir uniquement des composés simples mais toutes les compositions possibles de solutions solides.

Un large spectre d'applications

Les connaissances acquises et les méthodes élaborées au cours des recherches pourraient trouver de nombreuses applications, bien au-delà du seul domaine nucléaire. Un grand nombre de phénomènes physiques et de mécanismes fondamentaux dans des installations nucléaires s'appliquent tout aussi bien au comportement de ces mêmes matériaux en présence de jeux de contraintes généralement moins fortes ou simplement dans des emplois ou des environnements totalement différents. ■

Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques : archives, marqueurs et populations

Un défi d'intégration plurimillénaire

C. Pescatore, C. Mays*

Les spécialistes de la gestion des déchets radioactifs réfléchissent depuis longtemps au moyen de repérer durablement l'emplacement des centres de stockage, de sorte que les générations futures puissent en comprendre l'utilité et les dangers même si les archives écrites ont été perdues.

Pendant des années, on a considéré que le but de cette démarche était essentiellement de prévenir toute intrusion humaine involontaire dans un centre de stockage et donc l'exposition d'une personne aux rayonnements, l'intrusion pouvant également causer l'endommagement du système de dépôt et mettre en danger la population actuelle et les générations futures¹. Plus récemment, d'autres objectifs ont été évoqués, parmi lesquels le souhait de laisser aux générations futures une certaine latitude, au cas où elles décideraient de récupérer les déchets pour des raisons dépassant éventuellement le seul cadre de la sûreté, par exemple l'exploitation rentable du potentiel énergétique encore présent dans les déchets.

Au cours de leurs travaux de conceptualisation et de conception de marqueurs et d'archives, les scientifiques se sont jusqu'à présent surtout

concentrés sur la durabilité, en supposant que les centres de stockage seraient – et resteraient – totalement isolés de leur environnement culturel. Cependant, une nouvelle vision émerge aujourd'hui, selon laquelle il pourrait être utile de considérer les centres comme un élément du tissu social. La conservation de la mémoire serait alors facilitée par des mesures visant à mieux impliquer la communauté, et on pourrait aller jusqu'à prévoir que ces communautés créent leurs propres marqueurs en temps voulu, afin de remplacer les marqueurs plus anciens devenus obsolètes ou en partie effacés.

Il importe, d'une part, de comprendre que les centres de stockage resteront dangereux pendant une durée bien supérieure à quelques milliers d'années et, d'autre part, d'accepter que la capacité de la génération actuelle à préserver l'intégrité des structures est non pas éternelle, mais décroissante avec le temps. Il pourrait donc être nécessaire de penser en termes d'« avenir renouvelé », chaque génération se chargeant d'assurer la continuité et la sûreté du stockage pour les quelques générations suivantes, dans un souci constant de flexibilité et d'adaptabilité aux circonstances à mesure qu'elles évoluent. Le problème de la conception d'archives et de marqueurs physiques aussi durables que possibles (approche technologique) est toujours d'actualité². Toutefois, on commence à comprendre que ces archives et marqueurs peuvent être complétés par – ou intégrés à – une tradition culturelle qui naîtrait à l'époque de la planification et de l'ouverture d'un centre de stockage et se perpétuerait bien après la fermeture du centre.

* M. Claudio Pescatore (claudio.pescatore@oecd.org) est Administrateur principal dans la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN. Mme Claire Mays (claire.mays@oecd.org) est consultante auprès de l'AEN sur les questions de démarche participative et de processus décisionnels.

Un principe fondamental

Pour concevoir des marqueurs et des contrôles institutionnels du stockage en formation géologique, on se fondait jusqu'à présent sur l'hypothèse classique selon laquelle la sûreté est mieux garantie si l'installation est construite en un lieu éloigné de la population et de la communauté environnante et isolée par des barrières. Dans ce cas, les contrôles actifs envisagés pouvaient inclure des clôtures et des gardes de surveillance limitant l'accès au site, y compris après sa fermeture. Étant donné qu'il est impossible d'être absolument sûr que les générations futures entreteniront, surveilleront et interagiront avec l'installation, on admettait que les structures institutionnelles responsables des contrôles en place pourraient se désagréger. Dans cette éventualité, on a intégré dans les conceptions de stockages la notion de « sûreté passive », c'est-à-dire que l'installation doit pouvoir fonctionner sans intervention ni maintenance supplémentaire. En outre, on prévoyait des marqueurs et des archives afin de transmettre les informations concernant le site et ses dangers. Néanmoins, l'hypothèse tacite était presque toujours que les mesures prises doivent maintenir les personnes éloignées du site, afin de garantir au mieux la « sûreté ».

Pourtant, dans la vie quotidienne, la notion de sûreté implique une certaine forme de contrôle et de familiarité. Même si les contrôles actifs continus peuvent finir par disparaître, la familiarité et certains éléments de contrôle indirect restent importants pour la sûreté. En outre, puisque la sûreté est liée à notre faculté d'agir librement (sans être influencé par la peur), elle l'est également à notre qualité de vie. C'est pour ces raisons que le concept même de stockage a évolué. On admet désormais qu'il englobe, outre les tâches traditionnelles de surveillance et de contrôle, d'archivage des informations et de construction de marqueurs passifs, les notions de réversibilité/récupérabilité ainsi que la participation active des collectivités locales au processus décisionnel.

La nouvelle tendance étant à une plus forte implication des collectivités locales au processus décisionnel, il devient logique d'intégrer les centres de stockage au tissu social plutôt que de les exploiter de manière isolée – et il est de plus en plus communément admis qu'une telle intégration favorise la sûreté au lieu de l'entraver. Le dialogue avec les parties prenantes nous apprend que nous devons non seulement cesser de dissimuler les centres de stockage, mais aussi les reconnaître en tant qu'élément central de la collectivité d'accueil et de son identité. Aujourd'hui, le principe fondamental est tout simplement : « Ne dissimulez pas les centres de stockage ; ne les isolez pas ; faites-en une partie intégrante de la collectivité. »

L'approche technologique : conserver l'information

Les marqueurs et archives des centres de stockage en formation géologique ont d'abord été élaborés dans le but de garantir la durabilité et la conservation des informations, deux conditions jugées essentielles à la préservation des connaissances et de leur compréhension. À l'évidence, pour être exploitable, l'information doit d'abord exister et être relativement accessible.

Les archives qui doivent durer plusieurs milliers d'années devront être régulièrement renouvelées. Le papier a une durée de vie d'environ mille ans. Nous avons accès aux textes anciens car ils ont été recopiés à des intervalles compatibles avec la durée de stockage du papier. Les données conservées sur microfilms, bandes magnétiques ou disques optiques ne sont pas aussi durables puisque les technologies d'enregistrement et de lecture associées nécessitent constamment de nouveaux supports. Aujourd'hui, qui utilise encore des disquettes ? D'où cet autre message : lorsque les échelles de temps considérées sont très longues, la technologie d'enregistrement doit être aussi élémentaire que possible. La gravure sur pierre, comme en témoigne la pierre de Rosette, est un exemple de technologie simple sans papier.

Au-delà des difficultés liées aux limitations physiques des supports technologiques et à la lisibilité des informations, nous devons aussi réfléchir au problème de la survivance des informations en cas de changement politique ou institutionnel. La meilleure stratégie consiste à conserver délibérément plusieurs exemplaires des archives sur plusieurs sites, éventuellement disséminés dans le monde entier. La Pierre de Rosette est sans doute un exemple de ce principe de duplication. Les législations nationales imposent généralement d'archiver sur plusieurs sites les informations relatives aux centres de stockage.

Cependant, pour transmettre avec succès nos connaissances aux générations futures, nous devons nous assurer que les informations sont non seulement disponibles, mais aussi compréhensibles, ce qui constitue un défi considérable. Dans tous les cas, nos descendants seront confrontés à la question de l'interprétation des données fournies. Par exemple, les inscriptions médiévales ne sont interprétables que par des spécialistes, et il a fallu attendre Champollion pour que soient enfin déchiffrés les hiéroglyphes égyptiens à partir des symboles gravés sur la pierre de Rosette. L'interprétation des données se ferait beaucoup plus naturellement si les archives étaient périodiquement renouvelées, comme cela a été le cas pour les ouvrages anciens.

Au minimum, il faut une stratégie de sensibilisation continue de la population. Certaines copies partielles des données pourront être obtenues

d'autres sources institutionnelles, par exemple du cadastre, des activités minières ou des autorités de sûreté. Ces données permettront de « trianguler » les connaissances.

Pour que l'emplacement d'un centre de stockage reste connu du plus grand nombre, il suffit, par exemple, de le mentionner sur les cartes. Les cartes sont constamment renouvelées et mises à jour, et on les utilise quotidiennement. Il est également possible de prévoir des marqueurs passifs contenant un minimum d'informations, mais construits de telle sorte qu'ils soient évocateurs et incitent les gens à se renseigner davantage. Dans ce cas, il pourrait être nécessaire d'ériger plusieurs marqueurs pour chaque centre, conformément au principe de duplication des données. Ces marqueurs peuvent être placés tant en surface – là où la population peut en permanence interagir avec eux – qu'en subsurface, de manière à informer et/ou à mettre en garde les personnes qui procéderaient à des excavations³.

Enfin, on admet de plus en plus communément qu'au-delà des actions concrètes pour maintenir les connaissances, telles que la conservation d'archives en plusieurs exemplaires, des mécanismes plus culturels – plus informels mais susceptibles de se propager spontanément et de persister – pourraient également jouer un rôle important.

Un nouvel acteur clé ?

Nous avons parlé des institutions, des exploitants de centres de stockage, des autorités de sûreté : mais qui a le plus intérêt à préserver la mémoire ? Qui est le plus susceptible de vouloir rédiger, mettre à jour et réinterpréter les archives ? Il s'agit de la collectivité locale qui vit en permanence à proximité du centre de stockage. Dans l'idéal, ces collectivités devraient considérer les centres non pas comme une menace durable, mais comme quelque chose qui fait partie du tissu social local, qui exige le respect, et qui peut créer de la valeur, que ce soit au plan de la culture, de l'agrément ou de l'économie.

Le rapport du Forum sur la confiance des parties prenantes (FSC) intitulé *Créer un lien durable entre une installation de gestion de déchets et sa collectivité d'accueil*^{4,5} examine les méthodes permettant de satisfaire l'exigence de valeur ajoutée des installations de gestion de déchets radioactifs et, partant, d'établir un lien durable – pendant plusieurs siècles voire millénaires – entre une communauté et le site d'un centre de stockage. Ne serait-il pas possible, par exemple, de faire des centres de stockage des monuments commémoratifs ? Si l'on pouvait, à partir du centre ou de son image (symbolique), ériger un monument qui présente une originalité ou une qualité esthétique, ne serait-ce pas une raison pour les communautés d'être fières de posséder le site et de l'entretenir ? La question est finalement de savoir si l'installation de surface et ses alentours

ne devraient pas devenir le marqueur même de l'existence du centre de stockage souterrain.

Au premier siècle avant Jésus-Christ, l'architecte classique romain Vitruve a défini les principes d'une architecture réussie. Selon lui, une structure doit présenter trois qualités : *firmitas*, *utilitas* et *venustas*, c'est-à-dire la solidité ou la durabilité, l'utilité et la beauté. Ces qualités sont aussi à rechercher, lorsqu'on crée une installation de gestion de déchets radioactifs, tant dans la structure physique du bâtiment que dans les avantages de l'installation pour la collectivité.

Le FSC a étudié comment concevoir et construire des centres de stockage qui créent de la valeur, culturelle ou d'agrément, pour la collectivité locale et sa région. Par valeur culturelle et d'agrément, on entend tout élément susceptible d'améliorer le bien-être et la qualité de vie, que ce soit parce qu'il est source d'originalité, d'esthétique, de commodité ou de signification, parce qu'il offre aux résidents et aux visiteurs de nouvelles possibilités de rencontres, d'apprentissage, de détente ou de loisirs, ou parce qu'il favorise le développement de la communauté, par exemple, en lui permettant d'élever le niveau de formation de sa population, d'améliorer son image ou de rehausser sa capacité à résoudre les problèmes.

À partir de l'analyse des contributions (entretiens et questionnaires) de 32 parties prenantes et de l'expérience du FSC, on a pu identifier un certain nombre de caractéristiques de conception fondamentales qui favorisent l'instauration d'un lien durable entre un centre de stockage et la collectivité d'accueil. Un centre qui présente ces caractéristiques, qui peuvent être fonctionnelles, culturelles ou physiques, a plus de chances d'être « adopté » par les résidents de la collectivité d'accueil, parce qu'il s'intègre ou s'adapte à leur mode de vie, voire parce qu'il correspond à leurs préférences.

Une valeur ajoutée dérivée de caractéristiques fonctionnelles, culturelles ou physiques

La fonction d'une installation se rapporte aux différents usages auxquels elle peut être destinée. Une installation de gestion de déchets radioactifs doit satisfaire son objectif principal, à savoir la gestion à long terme des déchets radioactifs dans des conditions optimales de sûreté et de sécurité. Mais, bien pensée dans une optique multifonctionnelle, elle peut également être source de valeur ajoutée si elle est utilisable à d'autres fins intéressant directement les résidents et les visiteurs. De même, pendant son exploitation, elle peut servir la communauté scientifique. À titre d'exemple, des expériences sur la microgravité sont menées dans le laboratoire souterrain de la mine de Tono, au Japon, et les laboratoires du centre d'El Cabril, en Espagne, et du WIPP, aux États-Unis, sont exploitables pour l'analyse et la surveillance

de l'environnement à l'échelle régionale. De plus, lorsqu'on crée une nouvelle installation, il est nécessaire de prévoir la fin de sa vie utile. Si les besoins futurs ne sont pas anticipés, l'installation court le risque de devenir un fardeau pour la collectivité. Au contraire, si elle est adaptable et flexible, elle pourra rendre des services pendant son exploitation puis être transformée, à un coût raisonnable, en une installation entièrement dédiée à la collectivité lorsqu'elle aura cessé d'être utile au plan industriel⁵. L'adaptabilité et la flexibilité, associées à une planification rigoureuse de la sûreté radiologique du site, laissent ouvertes plusieurs options possibles.

La Déclaration universelle de l'UNESCO sur la diversité culturelle établit que la culture « doit être considérée comme l'ensemble des traits distinctifs spirituels et matériels, intellectuels et affectifs qui caractérisent une société ou un groupe social et qu'elle englobe, outre les arts et les lettres, les modes de vie, les façons de vivre ensemble, les systèmes de valeurs, les traditions et les croyances ». En ce sens, la culture peut être assimilée à un ensemble d'idées et de pratiques que l'on partage. Les valeurs culturelles se retrouvent dans tout ce qui reflète et renforce le savoir, les goûts, les aspirations, les valeurs éthiques ou les croyances d'une société donnée. Elles se retrouvent également dans tout ce qui est destiné à transmettre un patrimoine reconnu, à communiquer un sens symbolique ou à promouvoir des idéaux. Les caractéristiques de conception culturelles incluent tout d'abord l'originalité, qui signifie que l'installation (ou le site) est intéressante pour le public, qu'elle est unique en son genre et qu'elle peut devenir emblématique, donc jouir d'une bonne réputation et attirer des visiteurs. Viennent ensuite la qualité esthétique et la compréhensibilité, c'est-à-dire le fait pour l'installation d'être rattachée à un savoir existant et à la vie quotidienne. Enfin, la « mémorialisation » (conversion en monument) consiste à associer au site des marqueurs physiques et culturels qui l'identifient et racontent son histoire, de manière à ce que le public comprenne ce qui s'y trouve et s'en souvienne.

Si les spécifications techniques garantissent le niveau de protection requis (condition fondamentale posée par les parties prenantes consultées pour l'étude du FSC), les caractéristiques de conception physiques, elles, contribuent à instaurer un sentiment de sécurité (autre attente des parties prenantes de la collectivité et de la région). Ces caractéristiques peuvent être combinées pour assurer l'intégration harmonieuse de l'installation à son environnement géographique et pour augmenter la valeur d'agrément globale, c'est-à-dire l'attrait de l'installation et la satisfaction générale du public. L'accessibilité signifie que le site et l'installation ne sont pas barricadés, mais ouverts et accueillants. Des collectivités locales telles que celle de Port

Hope ont fait remarquer que si un site autorisé à fonctionner peut être librement visité, traversé ou utilisé à d'autres fins, c'est qu'il est nécessairement sûr. Il ne semble donc plus imposer de contraintes à l'utilisateur, ni exclure le public de façon alarmante. Il atteint son objectif de protection sans mettre en avant la notion de danger.

Il est bien sûr impossible d'ouvrir au public toutes les zones d'une installation de gestion de déchets radioactifs, en particulier pendant la période d'exploitation. On n'appliquera donc pas nécessairement les mêmes caractéristiques de conception fonctionnelles, culturelles et physiques aux zones dont l'accès doit être restreint pour des raisons de sûreté et de sécurité. Néanmoins, l'installation et son site doivent être considérés dans leur globalité, afin d'optimiser la valeur qu'il est possible d'ajouter, au prix d'un effort raisonnable.

Une valeur ajoutée dérivée du processus de planification et de mise en œuvre

Les parties prenantes locales qui participent activement aux études techniques de sites ou qui collaborent avec les exploitants de centres de stockage dans le cadre de partenariats officiels déclarent que le processus même de définition des caractéristiques souhaitées pour une installation et un site de gestion de déchets radioactifs peut être une source de valeur ajoutée pour la collectivité. Grâce au capital social (réseaux, normes et confiance) accumulé, la collectivité est mieux préparée à résoudre d'autres problèmes ou à prendre d'autres décisions. Les parties prenantes locales peuvent également concentrer leurs efforts sur l'identité, l'image et le profil de la communauté. Même lorsqu'elles ne sont pas favorables à l'implantation d'une installation de gestion de déchets radioactifs sur leur territoire, les collectivités peuvent saisir cette occasion pour mettre en place des indicateurs de qualité de vie et réfléchir à leur orientation au cours des années suivantes. L'afflux de travailleurs hautement qualifiés est un autre avantage, qui contribue à élever le niveau de formation global des résidents de la collectivité d'accueil. Enfin et surtout, lorsqu'une communauté d'accueil demande des formations et participe à la surveillance de l'aménagement et de l'exploitation du site, elle se donne les moyens de devenir une véritable gardienne du site, et donc une barrière supplémentaire du système de défense en profondeur⁶.

Lancer au plus tôt le processus de réflexion

Il faut du temps pour concevoir de nouvelles idées, de nouvelles possibilités ainsi que les intérêts spécifiques des collectivités. C'est pourquoi, il convient d'engager dès les premières étapes de la planification, voire avant même la conclusion de l'accord d'implantation, une réflexion d'ensemble sur les aspects techniques et socio-économiques

de l'installation de gestion de déchets radioactifs envisagée, ainsi que sur sa valeur ajoutée en termes de culture et d'agrément. Les informations, les concepts et les idées tirés de cette phase de réflexion feront partie des éléments en fonction desquels une collectivité locale pourra décider de se proposer pour accueillir une installation puis participer activement aux dernières étapes du processus d'implantation.

Les institutions ne peuvent généralement pas s'engager sur la forme définitive d'une installation de gestion de déchets radioactifs avant la sélection du site, ni sur le sort ultime de l'installation et son site. En outre, la relation entre une collectivité et une installation ou son site dépend en partie d'événements extérieurs (par exemple, les performances de sûreté du secteur nucléaire et du secteur de la gestion des déchets radioactifs, les positions et déclarations des acteurs politiques, etc.). Néanmoins, il est possible de mieux préparer les projets en réalisant des études de faisabilité et des enquêtes en sciences sociales dès le début du processus décisionnel. Une démarche de ce type est conforme à la Convention d'Aarhus de la CEE-ONU qui a officiellement donné à de nombreux citoyens européens le droit de participer aux décisions concernant leur environnement.

Dans son allocution à l'occasion de la réunion du FSC de juin 2007, Janet Kotra (US NRC) a expliqué que l'obligation d'installer des marqueurs « permanents » ne peut être satisfaite que si l'on admet que les marqueurs eux-mêmes évolueront au cours du temps, autrement dit qu'ils seront intégrés aux cultures locales successives et qu'ils seront (ou devront être, dans l'idéal) remplacés quand ils se dégradent matériellement ou quand leur sens évolue. Une fois de plus, l'accent est mis sur l'importance de l'intégration du centre de stockage dans la communauté : le « renouvellement » (par opposition à la « durabilité ») de la mémoire dépend des actions qu'entreprendront les populations futures. Ces populations seront d'autant plus susceptibles de connaître et de comprendre le sens des marqueurs que ces derniers feront partie de la vie quotidienne de la communauté, au lieu d'être maintenus à l'écart, isolés et oubliés.

Conclusions

Les centres de stockage de déchets radioactifs restent dangereux pendant une durée bien supérieure à quelques milliers d'années, c'est pourquoi il est important de comprendre que la capacité de la génération actuelle de maintenir l'intégrité des structures est non pas éternelle, mais décroissante au cours du temps. Par ailleurs, il est désormais admis que nous ne devons ni nous désintéresser de ces installations une fois construites, ni chercher à les dissimuler, même si nous les croyons sûres. De fait, le public se sentira en sécurité s'il conserve au fil du temps une certaine forme de familiarité et de contrôle sur l'installation. Il est donc nécessaire de penser en

termes d'« avenir renouvelé », chaque génération se chargeant d'assurer la continuité et la sûreté du stockage pour les quelques générations suivantes, dans un souci constant de flexibilité et d'adaptabilité aux circonstances à mesure qu'elles évoluent.

La question de la conception d'archives et de marqueurs physiques aussi durables que possible (approche technologique) est toujours d'actualité. Toutefois, on commence à comprendre que ces archives et marqueurs peuvent être complétés par – ou intégrés à – une tradition culturelle qui naîtrait à l'époque de la planification et de l'ouverture d'un centre de stockage et se perpétuerait bien après la fermeture du centre. L'obligation de conserver des archives et des marqueurs « permanents » ne peut être satisfaite que si l'on admet qu'ils évolueront au cours du temps, autrement dit qu'ils seront intégrés aux cultures locales successives et qu'ils seront (ou devront être, dans l'idéal) remplacés quand ils se dégraderont matériellement ou quand leur sens changera.

Étant donné qu'un centre de stockage est appelé à faire durablement partie de sa collectivité d'accueil, il est impératif d'établir une relation fructueuse et positive avec les résidents, ceux d'aujourd'hui comme ceux de demain. En d'autres termes, les concepteurs doivent créer des installations adaptées aux actuels besoins, ambitions et préférences de la population et qui puissent être modifiées, à un coût raisonnable, en fonction des besoins et des attentes des générations futures. Le véritable enjeu est de concevoir et de construire des centres (et leurs sites) qui soient non seulement acceptés, mais véritablement intégrés à la vie locale, voire source de fierté pour la collectivité. Certaines zones des installations et des sites pourraient alors elles-mêmes devenir des témoins appréciés de l'existence d'un centre de stockage souterrain. ■

Notes

1. De nombreux types de déchets chimiquement toxiques présentent le même risque, mais ce problème ne semble pas être prioritaire dans le domaine.
2. Voir le compte rendu de l'atelier « *Record Management and Long-Term Preservation and Retrieval of Information Regarding Radioactive Waste* » organisé à Rome les 27 et 28 janvier 2003 (document disponible auprès de SKB, en Suède, ou de l'AEN).
3. Voir par exemple T.L. Tolan, « *The Use of Protective Barriers to Deter Inadvertent Human Intrusion into a Mined Geologic Facility for the Disposal of Radioactive Waste* », Sand91-7097, Sandia National Labs, juin 1993.
4. AEN (2007), *Créer un lien durable entre une installation de gestion de déchets et sa collectivité d'accueil : Valeur ajoutée à travers la conception et les processus*, OCDE/AEN, Paris.
5. Voir aussi www.nea.fr/html/pub/newsletter/2007/fr/AEN_Infos-25-1-fsc.pdf.
6. Voir www.nea.fr/html/pub/newsletter/2007/fr/AEN_Infos-25-1-rwm.pdf.

Le retour d'expérience acquise en cours d'exploitation

B. Kaufer, K. McDonald*

Il y a environ 30 ans, au mois d'octobre 1978, le Comité de direction de l'énergie nucléaire abordait la question des échanges d'information sur les expériences d'exploitation sur les réacteurs à eau ordinaire. Il est intéressant de remarquer que cette discussion est intervenue avant l'accident de Three Mile Island, ce qui montre que le Comité de direction avait bien anticipé l'importance de ce problème. Le retour d'expérience d'exploitation présentait un double intérêt : 1) l'amélioration de la sûreté, et 2) l'amélioration de la disponibilité et de la fiabilité des centrales. Un outil du Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) a ainsi été créé pour recueillir ce retour d'expérience. Cet outil allait devenir ce que l'on appelle aujourd'hui le Système de notification des incidents (IRS).

En 1983, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) rejoint l'AEN pour exploiter conjointement le Système de notification des incidents. Au cours des 30 dernières années, on a développé la collecte et l'analyse d'expérience d'exploitation puis affiné grâce aux enseignements tirés. Le système a été élargi à d'autres installations nucléaires, à savoir des installations du cycle du combustible (Système de notification et d'analyse des incidents relatifs au cycle du combustible – FINAS) ainsi qu'aux réacteurs et laboratoires de recherche (Système de notification

des incidents concernant les réacteurs de recherche – IRSRR). De plus, l'industrie nucléaire a elle-même constitué une base de données indépendante pour recueillir et analyser l'expérience d'exploitation par l'entremise de la WANO (Association mondiale des exploitants de centrales nucléaires).

En réponse aux préoccupations de sûreté, au cours des dix dernières années, de nouvelles bases de données ont vu le jour avec les projets de l'AEN pour approfondir certains sujets comme les tuyauteries, les incendies et les systèmes informatisés. Parallèlement à la constitution de ces bases de données de retour d'expérience, l'AEN et l'AIEA ont créé plusieurs systèmes internationaux d'information à commencer par l'échelle internationale des événements nucléaires (INES) au début des années 90. Contentons-nous de mentionner, pour montrer le succès remporté par ces systèmes, que plus de 30 pays alimentent le système IRS et que le nombre d'événements enregistré dépasse 3 000.

Les progrès des techniques de retour d'expérience ont permis d'améliorer la sûreté. Toutefois, ces dernières années, on s'est demandé si l'information était utilisée proportionnellement à son importance. Lors d'une série de conférences internationales, de débats et de discussions au sein du Comité sur les activités nucléaires réglementaires, du Comité sur la sûreté des installations nucléaires, du Groupe de travail sur l'expérience acquise en cours d'exploitation (WGOE) et parmi les coordinateurs IRS lors de leurs échanges annuels d'informations, on s'est demandé si les leçons apprises dans le passé avaient été ultérieurement oubliées et si certains pays étaient vraiment convaincus que le retour d'expérience des autres pays s'appliquait à leur propre situation.

Pour approfondir les principaux sujets, le CANR a créé en 2004 un groupe d'experts de haut niveau à qui l'on doit un « fascicule vert » dans lequel étaient

* M. Barry Kaufer (barry.kaufer@oecd.org) travaille dans la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN. Mme Kulvinder McDonald (kulvinder.mcdonald@hse.gsi.gov) travaille à la Health and Safety Executive du Royaume-Uni et est présidente du Groupe de travail de l'AEN sur l'expérience acquise en cours d'exploitation (WGOE).

répertoriés les défis pour les autorités de sûreté nucléaire (*L'utilisation du retour d'expérience : défis pour les autorités de sûreté nucléaire* – OCDE/AEN, 2006). Ce rapport, ainsi que des débats à haut niveau dans le monde entier, ont incité le CANR à donner mission au WGOE de passer en revue les mécanismes et réseaux internationaux de retour d'expérience ainsi que leurs connexions avec les systèmes de retour d'expérience nationaux et à formuler des recommandations relatives à des améliorations de leur utilisation qui permettent de renforcer encore la sûreté nucléaire.

Les résultats de l'étude du WGOE ont été publiés dans un rapport du CANR intitulé « *The Use of International Operating Experience Feedback for Improving Nuclear Safety* » (NEA/CNRA/R(2008)3, janvier 2008). Ce rapport analyse tous les systèmes internationaux actuels (IRS, FINAS et IRSRR) de retour d'expérience sur toutes les installations nucléaires. Il fait valoir qu'il n'est intéressant de mettre au point un mécanisme du retour d'expérience et un réseau pour le mettre en œuvre que s'il existe un lien avec la réduction du risque et l'amélioration de la sûreté en exploitation. La collecte du retour d'expérience doit, en général, servir à prévenir la répétition d'événements présentant des dangers potentiels graves. On peut remarquer que l'on a tiré les enseignements de nombreux événements tant dans l'industrie nucléaire qu'à l'extérieur et que des mesures correctives ont été prises pour améliorer la sûreté nucléaire. Malgré cela, le rapport juge indispensable une poursuite continue de l'effort d'amélioration.

Concernant le rôle de l'autorité de sûreté, ce rapport souligne que l'exploitant a la responsabilité d'exploiter son installation nucléaire en toute sécurité. Aucune action de l'autorité de sûreté ne peut en aucun cas décharger l'exploitant, ne serait-ce que partiellement, de sa responsabilité fondamentale vis-à-vis de la sûreté. De même, il appartient à l'exploitant de recueillir les données de retour d'expérience et ce retour d'expérience national constitue la base du retour d'expérience international. En d'autres termes, sans retour d'expérience national de qualité, il n'est pas possible d'assurer un retour d'expérience international.

Pour présenter un intérêt général, un retour d'expérience ne se limite pas aux événements, incidents ou accidents, mais inclut les conditions, observations et informations nouvelles susceptibles de se répercuter sur la sûreté nucléaire. En d'autres termes, un processus de retour d'expérience efficace permet d'enregistrer toute expérience ayant conduit à l'adoption d'actions correctives importantes concernant le comportement humain, le matériel ou les pratiques de gestion de la sûreté. De même,

il intègre des informations sur les programmes de recherche en sûreté qui ont été lancés pour résoudre un problème de sûreté nouveau, qu'il soit ou non le résultat d'un incident survenu dans une installation nucléaire. De plus, il faut organiser des échanges d'informations sur des pratiques exemplaires susceptibles d'aider les autres participants à avancer dans leur programme d'amélioration de la sûreté.

À l'aide des principaux éléments décrits dans le guide de sûreté de l'AIEA NS-G-2.1 adapté pour pouvoir être utilisé à l'échelle internationale, le rapport établit un bilan des systèmes nationaux et internationaux de retour d'expérience. Il répertorie les aspects positifs et négatifs des systèmes internationaux existants, évalue les objectifs des autorités de sûreté et présente 21 recommandations pour améliorer les systèmes internationaux en fonction de ces objectifs.

Le rapport identifie les points forts des systèmes internationaux existants : possibilité d'utiliser l'internet pour notifier les incidents dans les systèmes IRS et IRSRR avec les infrastructures nécessaires, échanges dans le cadre de réseaux internationaux, conférences ou séminaires pour fournir des guides dans l'analyse des différents problèmes. Toutefois, plusieurs aspects ont été jugés particulièrement insuffisants au niveau international comparés aux objectifs identifiés et notamment l'absence de contrôle stratégique global de ces systèmes internationaux, le fait que la base FINAS ne puisse fonctionner sur l'internet, l'incapacité de certains systèmes actuels d'intégrer les enseignements tirés de l'expérience, et les techniques inadaptées de sélection d'événements et d'élaboration de tendances pour déterminer les priorités et programmes de travail futurs.

Ces recommandations ont été classées en plusieurs catégories, comme suit : questions stratégiques, pratiques de notification, tri des événements en fonction de leur importance pour la sûreté, enquêtes et interventions des autorités de sûreté et diffusion et échange des informations. En voici les principales :

- Étant donné les interfaces nécessaires entre les systèmes nationaux et internationaux, les membres de l'AEN devraient, dans les plus brefs délais, mettre sur pied des systèmes nationaux de retour d'expérience afin de s'aligner sur les meilleures pratiques internationales.
- Il est préconisé que les présidents des différents groupes s'occupant des systèmes internationaux de recueil du retour d'expérience s'associent aux présidents des groupes de travail de l'AEN pour constituer un bureau de pilotage qui assure un contrôle stratégique afin de clarifier les rôles des différentes organisations internationales, d'amé-

liorer la coordination de leurs travaux et de s'assurer de la mise en œuvre des changements.

- Les systèmes internationaux de retour d'expérience devraient se concentrer sur la collecte d'informations d'excellente qualité sur les événements.
- Les groupes de travail se consacraient en priorité à l'analyse des événements et à l'évaluation de leur importance pour la sûreté du point de vue de l'autorité réglementaire.
- Les systèmes internationaux de retour d'expérience devraient enregistrer des rapports sur les bonnes pratiques, en plus des rapports d'événements, et couvrir la durée de vie totale de l'installation.
- Les groupes de travail de l'AEN devraient chaque année trier les événements en fonction de leur importance pour la sûreté, des enseignements tirés et de la pertinence d'un suivi de l'autorité de sûreté.
- Il faudrait que les organisations internationales de retour d'expérience mettent à profit leur expérience et leurs moyens techniques pour améliorer la qualité des rapport d'événements et assister les pays pour qui la notification des événements est nouvelle ou qui souhaitent intensifier cette activité.
- Les groupes de travail de l'AEN doivent mettre au point une méthodologie permettant de dégager des tendances internationales significatives (avec les systèmes actuels ou d'autres moyens) que l'on puisse exploiter ensuite dans une base de données de qualité pour en tirer des enseignements.
- Les informations (y compris les études spécifiques, des rapports généraux, etc.) émanant des systèmes nationaux et internationaux de retour d'expérience mais aussi des groupes d'experts travaillant sur le sujet doivent être diffusés le plus largement possible (sans toutefois divulguer des données confidentielles).

Le WGOE a également souligné tout l'intérêt de la situation actuelle du nucléaire où l'on voit de nombreux pays membres de l'AEN envisager de construire de nouvelles centrales. La création d'un système de retour d'expérience qui soit conforme aux besoins des autorités de sûreté tels que définis dans le rapport permettrait effectivement de mettre sur pied une nouvelle base fiable, efficace et opérationnelle d'enseignements dont pourrait bénéficier la génération III+ des futures centrales nucléaires, y compris au cours de la phase de construction. La réalisation de ces travaux aujourd'hui marque, pour les autorités de sûreté, un nouveau départ, du moins en ce qui concerne la prochaine génération

de centrales avec, en outre l'avantage qu'elle permet de tirer des leçons sur la façon dont a été exploité jusqu'alors le retour d'expérience.

Compte tenu de ces facteurs et de la priorité élevée que lui accorde le CANR, le Groupe de travail sur la réglementation des nouveaux réacteurs qui vient d'être constitué a entrepris de créer une nouvelle base de données dans laquelle sera enregistrée l'expérience acquise au cours de la construction et qui pourra être utilisée à court et à moyen terme pour améliorer la sûreté nucléaire.

Ces dernières années, les spécialistes de l'AEN ont observé que la quasi-totalité des événements significatifs récents signalés lors de réunions internationales s'étaient déjà produits sous une forme ou une autre. Les contre-mesures sont en général connues mais l'information semble n'avoir pas toujours atteint les utilisateurs finals de même que les programmes d'actions correctives ne sont pas toujours rigoureusement appliqués. Cela signifie, par conséquent que, pour préserver les bons résultats obtenus récemment en sûreté d'exploitation, il faudra faire en sorte que le retour d'expérience soit promptement communiqué aux systèmes internationaux de collecte et que les enseignements qui en sont tirés soient effectivement exploités pour améliorer la sûreté.

Ce rapport apporte une nouvelle impulsion aux efforts effectués pour améliorer le retour d'expérience international. Le WGOE a établi un plan de mise en œuvre des recommandations du rapport avec la répartition des responsabilités et le calendrier. Ce plan a été globalement approuvé par le CANR lors de sa session de l'été 2008 et est en voie d'application. Le CANR a demandé au WGOE de suivre les progrès réalisés en la matière tous les deux ans et de s'assurer ainsi que la dynamique d'amélioration du retour d'expérience est conservée et qu'elle apporte les bénéfices attendus pour la sûreté nucléaire à l'échelle de la planète. ■

La communication des autorités de sûreté : 10 ans de progrès

J. Gauvain, A. Jörle, L. Chaniel*

L'AEN a pour mission 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. Dans ce cadre, le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR) de l'AEN est le forum où des représentants de haut niveau des autorités de sûreté échangent informations et expérience sur les politiques et pratiques réglementaires des pays membres de l'AEN dans le domaine de l'énergie nucléaire, et où ils analysent les évolutions qui pourraient avoir des répercussions sur les exigences réglementaires.

La confiance du public dans le gouvernement et dans les structures de gestion des risques est importante pour tous les pays développés ayant une société ouverte. L'utilisation de l'énergie nucléaire dans une démocratie est établie sur une certaine confiance dans le système politique et dans les autorités nationales. Pour stimuler et maintenir

une telle confiance dans une période d'examen plus minutieux des activités nucléaires par le public, un certain nombre d'autorités de sûreté nucléaire lancent divers processus pour informer proactivement le public au sujet de leur surveillance et de leur contrôle des activités nucléaires, ou le cas échéant pour faire participer le public dans la prise de décision.

En 1998, il est apparu au CANR que la confiance que le public accordait à l'autorité de sûreté pouvait varier considérablement d'un pays à l'autre, incitant les pays membres à entreprendre une activité afin de bénéficier de l'expérience des autres et de tirer des enseignements de pratiques exemplaires en matière de communication avec leur public. L'AEN a ainsi organisé trois ateliers et un Groupe de travail sur la communication des autorités de sûreté nucléaire avec le public a été créé en 2001. Les principaux résultats sont résumés ci-dessous.

Attentes de la société actuelle en matière d'information sur l'énergie nucléaire

L'inquiétude du public concernant l'utilisation de l'énergie nucléaire a longtemps été présente, probablement en raison de son utilisation première dans des contextes militaires. Cependant, l'accident de Three Mile Island 2 en 1979 est vu dans beaucoup de pays comme un tournant dans l'opinion publique. La demande du public pour des informations sur des activités nucléaires et l'assurance de leur gestion appropriée s'est développée à partir de ce moment-là.

Dans les sociétés modernes, le public est enclin à exiger des justifications des décisions prises par le gouvernement, mais les constitutions de la plupart des pays lui assurent des garanties plutôt vagues à cet égard. C'est pourquoi, nombreux sont les pays

* M. Anders Jörle (anders.jorle@foreign.ministry.se), actuellement Chargé de l'information au ministère des Affaires étrangères de la Suède a, en qualité de Chef de l'information de l'Autorité de sûreté nucléaire suédoise, présidé les travaux du CANR sur la communication depuis leur origine jusqu'au début de l'année 2008. Depuis, cette fonction est assurée par M. Luc Chaniel (luc.chaniel@asn.fr), Chargé de la communication de l'Autorité de sûreté nucléaire française. M. Jean Gauvain (jean.gauvain@oecd.org) travaille dans la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN.

qui ont adopté des lois spécifiquement consacrées à la liberté de l'information qui garantissent l'accès du public à toute information ou archive officielle que détiennent des instances publiques. Les restrictions sont rares et varient d'ailleurs suivant le pays. La plus ancienne de ces lois remonte à 1766 (la loi sur la liberté de la presse en Suède). La seconde a été adoptée en 1966 seulement, par les États-Unis, et l'on ne comptait que cinq pays membres de l'OCDE dotés de ce type de loi avant que ne se produise l'accident de Tchernobyl en 1986. Ce problème de l'accès de tout citoyen aux documents publics a donné lieu à des discussions prolongées dans de nombreux pays, et il a fallu attendre 2006 (avec l'Allemagne et la Suisse) pour que tous les pays de l'OCDE aient une loi sur la liberté de l'information en vigueur.

De plus, dans certains pays des lois ou réglementations donnent au public le droit d'accéder à tout type d'information archivée quels que soient la nationalité ou la situation géographique de la personne qui en fait la demande, ou l'ancienneté de l'information. En tant qu'instance publique, l'autorité de sûreté nucléaire doit faire savoir à toute personne qui le demande si oui ou non elle détient l'information. Si c'est le cas, elle est tenue de la lui communiquer à moins que cette information ne fasse l'objet de l'une des exemptions prévues dans la loi ou la réglementation en question.

Principales observations tirées des trois ateliers sur la communication des autorités de sûreté nucléaire

Trois ateliers internationaux ont été organisés par le CANR depuis 2000 pour soutenir l'échange de réflexion et le retour d'expérience, les autorités de sûreté nucléaire portant de plus en plus leur attention sur les activités destinées à informer et à impliquer le public :

- Investir dans la confiance : les autorités de sûreté nucléaire et le public, Paris, décembre 2000.
- Constuire, mesurer et améliorer la confiance du public, Ottawa, mai 2004.
- La transparence des activités des autorités de sûreté nucléaire, Tokyo, mai 2007.

La forte participation de hauts responsables et membres des autorités de sûreté lors du premier atelier a bien montré l'importance accordée à ces sujets. Malgré la diversité des approches de la communication, il est apparu que les pays participants ont beaucoup à gagner d'un approfondissement des échanges. C'est pourquoi, en 2001, le CANR a créé le Groupe de travail sur la communication des autorités de sûreté nucléaire avec le public (WGPC) qui a abordé divers aspects

de la communication, mis en place un système d'échange rapide d'informations et publié des pratiques de communication recommandables.

Une première observation d'ordre général découlant des ateliers est que des lois relatives à la liberté de l'information en vigueur dans les pays de l'OCDE ont des impacts sur l'activité de réglementation et que, dans certains pays, elles sont venues compléter des lois spécifiques qui soulignent l'importance de la transparence nucléaire et prévoient sa mise en œuvre.

Une autre observation générale annexe est que les attentes du public à l'égard des autorités de sûreté se sont nettement accentuées dans tous les pays au cours des vingt dernières années et ces dernières ont dû, à leur tour, développer considérablement leurs activités dans le but d'informer le public.

Les conclusions des ateliers et des discussions au sein du WGPC ont démontré la nécessité de la démarche participative en sûreté nucléaire pour améliorer la sûreté mais aussi renforcer la confiance du public. Des mécanismes et outils de communication doivent alors être mis en place pour permettre le dialogue entre les parties intéressées et les décideurs. De plus, la politique en la matière ne saurait être efficace sans que l'on y consacre des moyens particuliers.

Internet a profondément modifié le lectorat des documents et articles originaux puisqu'il est désormais possible d'y accéder directement. À cet égard, la création des sites internet des autorités de sûreté, qui se sont considérablement améliorés au cours des dix dernières années, permet de ne pas laisser aux seuls médias le soin d'interpréter et de transmettre des décisions et documents techniques au public. De ce point de vue, il s'agit d'un changement radical des possibilités de communiquer en direct avec le public et de créer un climat de confiance.

Les ateliers et les activités courantes du groupe de travail ont progressivement démontré que l'opinion dominante qui voulait que la communication dépende fortement du contexte culturel et que le retour d'expérience était difficilement transposable d'un pays à l'autre, vaut de moins en moins. Les échanges et études du CANR/WGPC montrent de plus en plus que des principes et des pratiques identiques pour leur communication avec le public sur les activités nucléaires réglementaires sont désormais partagés dans les pays de l'OCDE. Et le groupe de travail de l'AEN a contribué directement à ce mouvement. La communication des autorités de sûreté nucléaire est sans conteste un domaine où l'expérience des plus avancés a été exploitée avec profit pour aider les autres.

Contribution du CANR au rapprochement des pratiques de communication

Il est difficile de mesurer l'impact des activités du WGPC dans les divers pays et parmi les autorités de sûreté participantes. Cependant, le groupe de travail s'est avéré être un forum utile pour discuter des difficultés et des défis mutuels, comme pour comparer les différentes solutions trouvées. Les initiatives comme la plateforme « *Flashnews* » mentionnée ci-dessous apportent une contribution directe à la promptitude de communication.

Cette activité du CANR a révélé que la plupart des autorités de sûreté des pays de l'OCDE sont désormais dotées d'un service de communication ou du moins d'attachés de presse. D'où l'on peut conclure que la communication avec le public fait désormais partie intégrante de leur mission. À cet effet, elles ont souvent établi des plans de communication définissant la mission de l'autorité, sa stratégie de communication ainsi que ses objectifs en la matière.

Si les pratiques de communication sont fortement marquées par le contexte culturel national, les autorités de sûreté reconnaissent pourtant qu'elles ont tiré bien des leçons de l'expérience des autres pays. Dans le village mondial qui est le nôtre, le public s'intéresse à ce qui se passe ailleurs et a les moyens de le savoir. Il est donc primordial que les responsables de la communication des autorités de sûreté nucléaire restent en contact étroit s'ils veulent s'assurer d'être la principale source d'information du public sur la sûreté nucléaire. Le réseau qu'ils ont établi (avec la plateforme électronique « *Flashnews* ») est devenu un élément essentiel d'une information cohérente du public. Au cas où se produirait un incident dans un pays, les autorités de sûreté seraient désormais informées avant les médias et pourraient donc communiquer avec le public de manière plus cohérente et plus fiable au niveau international.

Problèmes non résolus dans la communication avec le public

Il reste toutefois quelques problèmes que doivent résoudre les autorités de sûreté, et notamment comment mettre au point une communication à la fois efficace et opportune avec le public en cas de crise, par exemple s'il devait survenir un incident dans une installation nucléaire. Par ailleurs, il faudra trouver le juste équilibre entre la recherche de la transparence et les limites qui pourraient être imposées pour des raisons de sécurité à la divulgation de certaines informations. Enfin, on aura besoin de moyens de mesurer la confiance qu'accorde le public aux autorités de sûreté si l'on veut que ces dernières puissent continuer d'améliorer leur communication.

En résumé, depuis que leurs principes et pratiques de communication se sont rapprochés, les autorités de sûreté nucléaire des pays membres de l'OCDE voient s'ouvrir devant elles de nouveaux domaines d'intérêt pratique. Il faut veiller à continuer de renforcer la confiance du public dans la façon dont les autorités de sûreté s'acquittent de leurs responsabilités de contrôle de la sûreté nucléaire et de protection de la santé publique et de l'environnement.

Depuis qu'il a vu le jour, le WGPC a déjà traité de nombreux sujets et bien avancé. Toutefois, il reste du travail à accomplir pour améliorer l'efficacité et l'efficacité de la communication avec le public et faire en sorte que le public accorde une grande confiance aux autorités de sûreté de tous les pays membres de l'OCDE. Le WGPC a démontré que les échanges actuels entre pays, où les autorités de sûreté se communiquent de bonnes pratiques qu'elles ont appliquées (ou envisagent d'appliquer), sont utiles et doivent bénéficier de la plus grande visibilité. Non content d'assurer le fonctionnement d'un réseau d'information sur des événements qui intéressent les médias, le WGPC a retenu, parmi les principaux sujets relevant de la communication, l'information du public local, la mesure des perceptions du public, la transparence des activités des autorités de sûreté et la communication de crise. Il a entrepris de structurer ces activités sous forme d'un plan intégré afin de continuer d'accompagner les progrès des autorités de sûreté dans leur communication avec le public. ■

Références

1. AEN (2001), *Investing in Trust: Nuclear Regulators and the Public*, Actes d'un atelier, Paris, France, 29 novembre-1^{er} décembre 2000, OCDE, Paris.
2. AEN (2006), *Building, Measuring and Improving Public Confidence in the Nuclear Regulator*, Actes d'un atelier, Ottawa, Canada, 18-20 mai 2004, OCDE, Paris.
3. AEN (2007), *Transparency of Nuclear Regulatory Activities*, Actes d'un atelier, Tokyo et Tokai-Mura, Japon, 22-24 mai 2007, OCDE, Paris.

Nouvelles brèves

Actualité juridique : Turquie

Loi turque sur la construction et l'exploitation des centrales nucléaires et la vente d'énergie

Le 21 novembre 2007, la Turquie a adopté une loi sur la construction et l'exploitation de centrales nucléaires et la vente d'énergie¹ qui ouvre la voie à la construction de la première centrale nucléaire du pays à laquelle ce dernier aspire depuis plus de trente ans.

Cette loi revêt un caractère procédural car elle dresse la liste des étapes à accomplir par les institutions qui doivent la mettre en œuvre. L'Autorité turque de l'énergie atomique (TAEK) doit définir les critères que les entreprises envisageant de construire et d'exploiter une centrale nucléaire devront respecter. Il s'agit de critères relatifs à la sûreté nucléaire, à la délivrance des autorisations, à la filière de réacteur, à la durée de vie de l'installation, à la technologie des matériels et du combustible, à l'implantation géographique, aux performances d'exploitation ainsi qu'à la production électrique. Ils ont déjà été publiés par TAEK².

Le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles a publié un règlement décrivant les exigences applicables aux entreprises soumissionnaires, le processus de sélection, le mode d'attribution du terrain, les redevances dues pour la délivrance des autorisations, les incitations relatives aux infrastructures, l'approvisionnement en combustible, la capacité de production, la quantité d'électricité qu'achètera la Compagnie turque du commerce et des contrats en matière d'électricité (TETAŞ) ainsi que le coût unitaire de l'énergie³. Cette réglementation adoptée, la TETAŞ a lancé le processus d'appel d'offres le 24 mars 2008, invitant les entreprises locales et étrangères à présenter leurs offres avant le 24 septembre 2008.

La loi stipule que TETAŞ achètera l'électricité produite dans les centrales nucléaires aux termes d'un contrat signé entre l'entreprise sélectionnée et TETAŞ pendant une période qui ne peut excéder 15 ans à compter de la mise en service de la centrale⁴.

S'agissant de la responsabilité civile, la loi dispose qu'en cas d'accident survenant dans une centrale nucléaire ou lors du transport de combustible

nucléaire, de matières ou de déchets radioactifs, la Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire de 1960 s'appliquera, de même que ses amendements et toutes les autres dispositions nationales et internationales sur la responsabilité civile⁵. La Turquie est partie à la Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire de 1960 et à ses Protocoles d'amendement de 1964 et de 1982. Elle a également signé le Protocole d'amendement de 2004.

Il est à noter que la nouvelle loi contient une disposition par laquelle l'entreprise construisant la centrale nucléaire est tenue de consacrer 1 % de ses recettes annuelles à des activités de recherche-développement⁶.

Enfin, la nouvelle loi prévoit que le Conseil des ministres peut créer des entreprises publiques pour construire, exploiter et vendre l'électricité produite, une disposition qui peut être interprétée comme représentative de la détermination du pays à réussir cette nouvelle tentative d'introduire l'énergie nucléaire.

Contexte

La Turquie a déjà fait plusieurs tentatives pour adopter l'énergie nucléaire. Dès 1965, elle a entrepris des études préliminaires à la construction d'une centrale nucléaire. Entre 1967 et 1970, elle a effectué une étude de faisabilité avec l'objectif de construire une centrale nucléaire et la mettre en service avant 1977. Toutefois, des difficultés liées à la sélection du site notamment ont empêché le projet d'aboutir. En 1974 et 1975, dans une deuxième tentative, le pays a procédé à des études de sélection du site qui ont conclu à la possibilité de construire la première centrale à Akkuyu, après quoi la Commission à l'énergie atomique a délivré un permis de site en 1976. L'année suivante, un appel d'offres a été lancé et les entreprises ASEA-ATOM et STAL-LAVAL ont remporté le contrat. Toutefois, en septembre 1980, la décision du gouvernement suédois de ne plus garantir un emprunt a entraîné l'annulation du projet. La troisième tentative remonte à 1980 lorsque trois entreprises ont remporté un contrat prévoyant la construction de quatre tranches nucléaires. Cependant, le projet échoua une fois de

plus en raison de difficultés financières. En 1993, le Haut Conseil à la science et la technologie a classé la production d'électricité nucléaire au troisième rang des priorités du pays. Au vu de cette décision, la Compagnie turque de production et de transport d'électricité (TEAŞ) a inscrit à son programme d'investissement de 1993 la construction d'une centrale nucléaire. L'appel d'offres a été lancé en 1997 mais une série de retards ont conduit le gouvernement, en juillet 2000, à différer le projet⁷.

La Turquie n'a pas de ressources énergétiques nationales importantes et est fortement tributaire des importations de gaz naturel⁸. En 2004, la puissance installée totale de production d'électricité de la Turquie était de 35,6 GWe, soit une augmentation de 36 % par rapport à 2000. Les centrales thermiques classiques (charbon, gaz, pétrole et géothermie) assuraient 68 % de la fourniture d'électricité du pays en 2004, le reste provenant

presque totalement de l'hydraulique. Pour améliorer la diversité de la fourniture et la sécurité énergétique du pays, l'énergie nucléaire est donc considérée comme une alternative importante aux sources d'énergie fossiles. ■

Notes

1. Une traduction non officielle du texte de la loi n° 5710 est reproduite dans le n° 80 du *Bulletin de droit nucléaire*, page 109.
2. Consultable en anglais à l'adresse : www.taek.gov.tr/olcutler/taekcriteria_final_211207.pdf.
3. Publié dans le journal officiel de la Turquie n° 26821 du 19 mars 2008.
4. Articles 4(1)(a) et 3(5) de la loi.
5. Article 5(5) de la loi.
6. Article 5(6) de la loi.
7. www.nea.fr/html/general/profiles/turkey.html.
8. Les deux tiers du gaz sont importés de la Fédération de Russie, et le reste principalement d'Iran.

Phase IV du projet TDB

Le projet de Base de données thermodynamiques sur les espèces chimiques (TDB) est une collaboration de longue date qui a été lancée afin de constituer, sous assurance qualité, une base de données thermodynamiques complète et bénéficiant de la caution internationale sur une sélection d'éléments chimiques. Cette base est en effet indispensable si l'on veut pouvoir procéder aux modélisations qui permettent ensuite d'évaluer les performances de systèmes de dépôts de déchets radioactifs et, en particulier, de calculer la migration des radioéléments à travers les barrières ouvragées et la géosphère.

Le projet TDB a pour atouts une méthode d'examen scientifiquement solide et un cadre organisationnel stable conforme à ses objectifs à long terme. Les principaux produits des examens sont des ouvrages publiés dans la collection *Chemical Thermodynamics* qui permettent :

- l'accès à la critique de données et de documents revus par les spécialistes mondiaux de la discipline ;
- un transfert de connaissances entre les équipes d'examineurs faisant partie du projet et les spécialistes de l'évaluation des performances ;
- l'identification des domaines à approfondir.

Le projet a vu le jour dans les années 80 lorsque l'on s'aperçut que les bases de données de l'époque

manquaient de cohérence interne et n'étaient pas suffisamment documentées pour que l'on puisse retrouver les sources de données initiales. Les caractéristiques thermodynamiques de l'uranium, de l'américium, du technétium, du neptunium et du plutonium ont été les premières données examinées et publiées. Elles ont été mises à jour au cours de la deuxième phase du projet (1998-2003) en même temps qu'étaient examinés d'autres espèces et composés inorganiques de produits de fission et d'activation comme le sélénium, le nickel et le zirconium. En outre, les examens de composés et complexes inorganiques (oxalates, citrates, EDTA et acide isosaccharinique) de tous ces éléments (U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni et Zr) ont été effectués et publiés en 2005.

Au cours de la troisième phase du projet TDB qui a débuté en 2003 et pris fin en 2008, il a été décidé d'examiner :

- le thorium (Th), choisi pour des raisons de cohérence chimique de la base de données sur les actinides ;
- l'étain (Sn), présent dans les déchets nucléaires, sous forme de produit de fission, et dont les propriétés thermochimiques présentent des lacunes et incohérences substantielles concernant les espèces pouvant contrôler la solubilité des éléments ;

- le fer (Fe), élément capital déterminant les conditions d'oxydoréduction (redox) dans les dépôts et pour lequel il manque une base de données thermochimiques cohérente.

Les participants au projet ont également entrepris d'établir des recommandations pour l'évaluation des données thermodynamiques sur les solutions solides. Ces solides, qui n'ont pas encore fait l'objet d'un examen systématique, sont susceptibles de fournir une description plus précise concernant la migration des déchets et la performance des barrières naturelles et ouvragées. L'ouvrage sur les solutions solides paru en 2007 est le 10^e volume de la collection consacrée à la TDB. L'examen des données sur le thorium devrait paraître en 2008, suivi des examens de l'étain (Sn) et du fer (Fe) au début de 2009.

La quatrième phase du projet TDB a démarré en février 2008 et devrait s'achever en 2012. Comme pour les trois premières phases, le projet est conduit par un Comité de pilotage constitué de représentants de 17 organisations¹ s'occupant de la gestion des déchets radioactifs dans 13 pays membres de l'OCDE. Il a été décidé de procéder à :

- des études complémentaires d'espèces et de composés inorganiques du fer (Fe) ;
- l'examen des données auxiliaires ;

- une mise à jour des bases de données recommandées établies au cours des trois premières phases du projet ;
- un examen des espèces et composés inorganiques du molybdène (Mo).

La première année du projet sera consacrée à la mise en route des activités et à la constitution des équipes d'examen qui réunissent des spécialistes mondiaux de chaque discipline. Les deux années suivantes verront le dépouillement de la littérature et des données sur le sujet et la sélection des valeurs recommandées. La dernière année sera réservée aux expertises et à la préparation de la publication.

Pour de plus amples informations sur le projet TDB, la base de données et les publications, consulter le site de l'AEN à l'adresse www.nea.fr/html/dbtdb. ■

Note

1. Les organisations participant à la quatrième phase du projet TDB sont les suivantes : FZK INE (Allemagne), ONDRAF/NIRAS (Belgique), SGDN (Canada), ENRESA (Espagne), ministère de l'Énergie (États-Unis), POSIVA (Finlande), ANDRA (France), CEA (France), JAEA (Japon), KAERI (République de Corée), SÚRAO/RAWRA (République tchèque), NDA (Royaume-Uni), Nexia Solutions (Royaume-Uni), SKB (Suède), DSN (Suisse), IPS (Suisse) et NAGRA (Suisse).

Einar SAELAND (1915-2008)

Directeur général de l'AEN
de 1964 à 1977



C'est avec une grande tristesse que nous avons appris le décès d'Einar Saeland le 25 mai 2008. Einar naquit le 3 avril 1915 à Trondheim, Norvège. Son père, Sem Saeland, était physicien et président de l'université d'Oslo, et sa mère Gudrun Schöning Saeland, une des premières femmes médecins en Norvège. Einar obtint son diplôme en chimie physique à l'université d'Oslo en 1939. En 1951, il épousa Elsebe Stoltenberg (1921-2000). Deux enfants naquirent de cette union : Sem (en 1952) et Nanna (en 1956).

Au début des années 50, Einar contribua à la création de l'Institut norvégien de recherche en matière d'énergie nucléaire à Kjeller, en Norvège, et en 1955 il représenta la Norvège à la première Conférence internationale sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique. De 1951 à 1956, il fut le représentant officiel de la Norvège auprès de la Société européenne d'énergie atomique. En 1958, il rejoignit l'OCDE à titre de Directeur adjoint de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), dont il devint le Directeur général de 1964 jusqu'à sa retraite en 1977.

Tous ceux qui l'ont connu se souviendront d'Einar comme un être humain exceptionnel, dont l'intelligence, la modestie, la générosité, et le sens de l'humour, auront servi de modèle à beaucoup. Il nous manquera.

Tout sur l'uranium

Compte tenu des besoins d'une population toujours plus importante et de la croissance économique, la demande mondiale d'électricité devrait continuer d'augmenter au cours des prochaines décennies. Comme de nombreux pays considèrent aujourd'hui que l'option nucléaire permet de produire de l'électricité en base à des prix concurrentiels, tout en minimisant les rejets de gaz à effet de serre et en renforçant la sécurité d'approvisionnement énergétique, les perspectives de croissance de la production électronucléaire s'améliorent.

Plusieurs pays ont entrepris de construire des centrales et de nombreux autres envisagent de recourir à l'énergie nucléaire, si bien que le problème de l'approvisionnement en uranium est à nouveau examiné avec beaucoup d'attention. Ces dernières années, sous l'effet de la hausse de la demande et de la diminution des stocks, les prix de l'uranium se sont envolés. L'industrie de l'uranium connaît de ce fait une nette reprise, qui met un terme à plus de deux décennies de sous-investissements.

Avec la hausse du prix de l'uranium sur le marché, les dépenses mondiales de prospection et de mise en valeur des mines d'uranium augmentent de façon substantielle. Même si, à l'échelle du globe, les activités de prospection restent en majorité concentrées dans des zones susceptibles de contenir des gisements liés à des discordances ou renfermés dans des grès qui se prêtent à la lixiviation *in situ* au voisinage immédiat de ressources connues et de centres de production existants, des travaux de prospection sont également entrepris dans des régions jugées favorables au cours de précédentes études, voire dans des régions auparavant peu explorées.

La récente hausse du prix de l'uranium a entraîné non seulement l'augmentation des investissements dans les activités de prospection, mais aussi la délimitation de nouvelles ressources, suite à la réévaluation de gisements existants et à la découverte de nouveaux gisements. Au rythme actuel de la consommation, les ressources identifiées peuvent approvisionner l'industrie pendant environ un siècle. Cependant, ces statistiques sont un instantané des informations que l'on possède à un moment donné sur des ressources rentables. Elles ne correspondent pas à la quantité totale d'uranium exploitable que contient la croûte terrestre. Si les conditions du marché continuent d'être favorables à la prospection, de nouvelles découvertes sont à prévoir, comme cela a déjà été le cas au cours des précédentes périodes de prospection intense. À titre d'exemple, la base de ressources en uranium de l'Australie s'est accrue de plus de 275 000 tonnes entre le début et le milieu de l'année 2007, du fait d'agrandissements et de nouvelles découvertes de gisements.

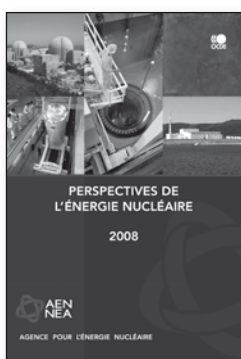
Contrairement à la prospection et à l'évaluation des ressources, qui ont très rapidement repris sous l'effet de la hausse des prix de l'uranium, l'exploitation minière n'a pas encore réagi au raffermissement du marché. Pour plusieurs raisons, parmi lesquelles des teneurs de minerais plus faibles que prévu, des événements météorologiques extrêmes, des dysfonctionnements de la chaîne d'approvisionnement et des difficultés techniques, la production a récemment reculé dans plusieurs pays (notamment l'Afrique du Sud, l'Australie, le Canada et la Namibie), compensant les augmentations de production notables enregistrées au Kazakhstan et, dans une moindre mesure, aux États-Unis. Bien que plusieurs pays aient entrepris ou prévoient de développer dans de fortes proportions leur production minière et que de nouveaux centres de production soient rapidement aménagés en Afrique, il faudra, pour satisfaire la demande croissante, que ces installations soient mises en service en temps utile et qu'elles fonctionnent à une cadence de production proche de leur capacité nominale. Il est clair que l'expansion de la capacité de production au moment voulu et la poursuite de l'augmentation de la base de ressources en uranium ne seront favorisées que si la demande d'uranium se maintient durablement à un niveau élevé.

Préparée conjointement par l'AEN et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), la publication *Uranium 2007 : Production, ressources et demande*, se fonde sur des données officielles communiquées par 40 pays pour passer en revue la situation de l'offre et de la demande mondiale d'uranium au 1^{er} janvier 2007, et présenter des données sur la prospection, les ressources, la production d'uranium et les besoins des réacteurs dans le monde. Il contient en outre de nouvelles informations et mises à jour importantes sur les principaux centres de production d'uranium en Afrique, Amérique du Nord, Asie centrale, Australie et Europe de l'Est. Enfin, il présente des projections de la puissance nucléaire installée et des besoins des réacteurs jusqu'en 2030, ainsi qu'une analyse des questions relatives à l'offre et la demande d'uranium à long terme.

Bien que le Livre rouge traite essentiellement des ressources, de la production et de la demande d'uranium, cette nouvelle édition aborde, comme la précédente, les aspects environnementaux du cycle de production de l'uranium. Plusieurs contributions nationales contiennent des descriptions de programmes de surveillance en place dans des mines en exploitation, des mises à jour concernant les travaux de démantèlement et de réaménagement menés dans des mines fermées et une synthèse des études d'impact environnemental de projets d'augmentation de la production. ■

Nouvelles publications

Aspects économiques et techniques du cycle du combustible nucléaire



Perspectives de l'énergie nucléaire 2008

ISBN 978-92-64-05416-5. 500 pages. Prix : € 105, US\$ 161, £ 81, ¥ 16 800.

Ces *Perspectives de l'énergie nucléaire* constituent le premier ouvrage en son genre dans le domaine nucléaire et répondent au regain d'intérêt de nombreux pays membres de l'OCDE pour cette forme d'énergie. En effet, alors que la demande mondiale d'énergie continue à croître inexorablement, maints pays se trouvent confrontés à de sérieux défis en ce qui concerne la sécurité de leurs approvisionnements en énergie, l'envolée des prix de l'énergie et le changement climatique qui résulte de la consommation des énergies fossiles. De plus en plus, l'énergie nucléaire est considérée comme ayant un rôle à jouer dans la résolution de ces problèmes.

À partir des données et des statistiques les plus récentes, ces *Perspectives* développent des projections jusqu'à l'horizon 2050 afin d'examiner des scénarios de croissance et leurs implications possibles sur l'exploitation future de l'énergie nucléaire. Elles offrent aussi des analyses inédites et des recommandations concernant les défis potentiels de demain.

La situation actuelle de l'énergie nucléaire, ses évolutions prévues et ses répercussions sur l'environnement, les ressources en uranium et la sécurité d'approvisionnement, les coûts, la sûreté et la réglementation, la gestion des déchets radioactifs et le démantèlement, la non prolifération et la sécurité, les régimes juridiques, les infrastructures, la participation du public, les réacteurs et les cycles du combustible avancés, tels sont les principaux thèmes traités dans cette publication.

La concurrence sur les marchés de l'industrie nucléaire

ISBN 978-92-64-05408-0. 136 pages. Prix : € 39, US\$ 60, £ 30, ¥ 6 200.

Les équipements, matériaux et services nécessaires pour la construction, l'exploitation et l'alimentation en combustible des centrales nucléaires sont aussi nombreux que variés. L'industrie nucléaire a, depuis les années 80, connu de nombreuses fusions et consolidations et vu naître quelques grands groupes mondiaux. En outre, l'ouverture des marchés de l'électricité de nombreux pays de l'OCDE accentue la pression concurrentielle sur les exploitants de centrales nucléaires.

Les changements structurels, qui ont marqué les producteurs comme les consommateurs du secteur nucléaire, se sont répercutés sur le niveau de la concurrence sur les marchés de l'ingénierie nucléaire et du cycle du combustible. Alors que se profile une reprise du nucléaire, la présente publication analyse la situation de la concurrence dans les principaux secteurs de l'industrie nucléaire ainsi que son évolution possible si la demande augmente de façon significative.

Données sur l'énergie nucléaire 2008/Nuclear Energy Data 2008

ISBN 978-92-64-04796-9. 116 pages. Prix : € 30, US\$ 46, £ 21, ¥ 4 100.

Cette nouvelle édition des *Données sur l'énergie nucléaire* de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, une compilation annuelle de statistiques essentielles sur l'énergie nucléaire, décrit les derniers développements dans

les projets de construction de centrales nucléaires et le cycle du combustible et présente des projections de la puissance nucléaire installée dans les pays membres jusqu'en 2030. Ce panorama complet de la situation actuelle et des tendances qui se dessinent dans divers secteurs du cycle du combustible nucléaire constitue l'ouvrage de référence pour les décideurs, les spécialistes et les chercheurs qui travaillent dans ce domaine.

Stockage définitif des déchets de haute activité : calendrier de mise en œuvre

ISBN 978-92-64-04657-3. 146 pages. Prix : € 45, US\$ 69, £ 32, ¥ 6 200.

Cette étude met en évidence les facteurs clés affectant le calendrier du stockage définitif des déchets radioactifs de haute activité. Elle analyse comment l'acceptation sociale, la robustesse technique, la prise en compte des aspects environnementaux et la faisabilité économique influencent les stratégies nationales concernant la gestion et le stockage définitif de tels déchets. À la lumière d'études de cas, elle présente aussi les approches stratégiques adoptées par différents pays dans leurs politiques nationales pour répondre aux préoccupations du public et aux attentes de la société civile en matière de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute activité. Les enseignements et conclusions tirés de l'étude confirment l'importance d'informer toutes les parties prenantes et de les faire participer au processus de décision si l'on veut réussir la mise en œuvre des politiques de stockage définitif des déchets radioactifs. Cette étude intéressera les décideurs et les analystes du secteur de l'énergie nucléaire ainsi que les experts dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs.

Uranium 2007 : Ressources, production et demande

ISBN 978-92-64-04770-9. 452 pages. Prix : € 120, US\$ 186, £ 86, ¥ 16 600.

Alors que plusieurs pays construisent des centrales nucléaires et que bien d'autres envisagent d'avoir recours à l'énergie nucléaire pour produire l'électricité nécessaire pour faire face à une demande croissante, l'industrie de l'uranium suscite un intérêt considérable. Ces dernières années, suite à l'augmentation de la demande et de la diminution des stocks, les prix de l'uranium ont considérablement augmenté. L'industrie de l'uranium connaît ainsi une nette reprise qui met un terme à plus de 20 ans de sous-investissements. Le « Livre rouge », établi conjointement par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire et l'Agence internationale de l'énergie atomique, est un ouvrage de référence de notoriété mondiale. Il se fonde sur des données officielles communiquées par 40 pays. Cette 22^e édition présente les résultats d'un examen approfondi de l'offre et de la demande mondiale d'uranium au 1^{er} janvier 2007, ainsi que des données sur la prospection, les ressources, la production d'uranium et les besoins des réacteurs dans le monde. Elle offre de nombreuses informations nouvelles en provenance de tous les grands centres de production d'Afrique, d'Australie, d'Asie centrale, d'Europe orientale et d'Amérique du Nord. Elle contient, en outre, des projections de la puissance nucléaire installée et des besoins des réacteurs en uranium jusqu'en 2030 ainsi qu'une analyse de l'offre et de la demande d'uranium à long terme.

Sûreté et réglementation nucléaires

Assurer la sûreté nucléaire : la mission des autorités réglementaires

ISBN 978-92-64-99051-7. 60 pages. Gratuit : versions papier ou web.

La mission fondamentale de toutes les autorités de sûreté nucléaire consiste à s'assurer que les installations nucléaires sont à tout moment exploitées de manière sûre puis démantelées en toute sécurité. Dans l'accomplissement de sa mission, l'autorité de sûreté ne doit pas oublier que la responsabilité d'exploiter en toute sécurité une installation nucléaire revient à l'exploitant et que la sienne est de contrôler les activités de l'exploitant pour s'assurer que les conditions de fonctionnement de l'installation sont sûres. Aujourd'hui l'autorité de sûreté dispose de nombreuses sources d'informations sur la sûreté d'une installation nucléaire : les rapports d'inspection, le retour d'expérience, les résultats des recherches, les examens périodiques de sûreté, les résultats des études probabilistes de sûreté (EPS), les enseignements tirés des audits de l'AIEA, pour n'en citer que quelques-unes. Un des principaux défis

consiste alors à recueillir et à analyser systématiquement ces informations pour se faire une idée globale du niveau de sûreté de l'installation en question puis ensuite de juger si ce niveau est acceptable. C'est pour aider ses pays membres à relever ce défi que le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR) de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire a préparé ce rapport. Le rapport s'intéresse essentiellement à la façon dont l'autorité de sûreté peut systématiquement recueillir et analyser de manière intégrée toutes les informations pertinentes sur la sûreté pour porter un jugement valide sur l'acceptabilité du niveau de la sûreté des installations qu'elle contrôle. Ce rapport s'adresse donc avant tout aux autorités de sûreté nucléaire, même si les informations et idées qu'il renferme sont susceptibles d'intéresser des exploitants nucléaires, d'autres organisations dans l'industrie nucléaire ainsi que certains membres du public.

CSNI Collective Statement on Support Facilities for Existing and Advanced Reactors

The Function of OECD/NEA Joint Projects - NEA Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI)

ISBN 978-92-64-99052-4. 16 pages. Gratuit : versions papier ou web.

The Role of Research in a Regulatory Context (RRRC-2)

Workshop Proceedings, Paris, France, 5 December 2007

ISBN 978-92-64-99045-6. 136 pages. Free: paper or web.

VO = existe en anglais seulement.

Radioprotection

Dialogue avec les parties prenantes sur les répercussions des recommandations de la CIPR

Synthèse des trois conférences de l'AEN/CIPR

ISBN 978-92-64-99043-2. 48 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Depuis sa création, le Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH) participe à l'examen et à l'application des recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). L'élaboration de nouvelles recommandations générales de la CIPR pour remplacer la Publication 60 de la CIPR de 1990, intéressait donc au plus haut point l'AEN et ses pays membres, et c'est pourquoi l'Agence a mis en place une démarche de concertation et de dialogue avec la CIPR afin de s'assurer que les points de vues et préoccupations de ses pays membres puissent s'exprimer et soient pris en compte dans ces nouvelles recommandations. La Commission principale de la CIPR a approuvé les nouvelles recommandations au mois de mars 2007. À cette date l'AEN avait organisé 7 conférences internationales et rédigé 13 publications sur le sujet. Le présent rapport fait la synthèse des trois conférences internationales (Tokyo, 5 et 6 juillet 2006, Washington, DC, 28 et 29 août 2006 et Prague, 24 et 25 octobre 2006) organisées afin de communiquer à la CIPR des commentaires sur son projet de recommandations de juin 2006. Le lecteur y trouvera une présentation des grandes lignes du projet de recommandations, un résumé des suggestions faites au cours des trois conférences ainsi qu'une description de l'évolution significative de la façon dont la CIPR a présenté son projet de recommandations au fil des conférences.

Occupational Exposures at Nuclear Power Plants

Sixteenth Annual Report of the ISOE Programme, 2006

ISBN 978-92-64-99042-5. 120 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Gestion des déchets radioactifs

Dispositions réglementaires pour le déclassé des installations nucléaires

Points importants et pratiques émergentes

ISBN 978-92-64-99060-9. 88 pages. Gratuit : versions papier ou web.

L'enlèvement des matières irradiées et plus particulièrement du combustible à l'issue de l'arrêt définitif d'une installation élimine la source principale de risque radiologique, le risque de criticité. Associé à l'arrêt de l'exploitation et à l'utilisation de procédés à haute température et pression, il induit une diminution significative des risques à la santé publique et à l'environnement. Les procédés utilisés lors des opérations de démantèlement – pour la découpe et le démontage de structures – induisent à la fois des risques conventionnels et radiologiques, comme par exemple les coupes à l'explosif. Des risques radiologiques demeurent en raison de la possibilité d'entrer en contact avec des matériels contaminés ou activés. Ce rapport présente la nécessaire adaptation des contraintes réglementaires et aux risques associés liés aux opérations de démantèlement. Il présente des exemples de pratiques mises en œuvre dans plusieurs pays qui mènent de grands programmes de déclassé pour illustrer les nouvelles tendances réglementaires.

Progresser sur la voie du stockage géologique des déchets radioactifs

Déclaration collective du Comité de la gestion des déchets radioactifs (RWMC) de l'AEN

ISBN 978-92-64-99058-6. 24 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Le Comité de la gestion des déchets radioactifs (RWMC) de l'AEN a mis en avant les fondements environnementaux et éthiques relatifs au stockage géologique et s'est prononcé sur sa faisabilité technique par l'intermédiaire de plusieurs déclarations collectives antérieures. Depuis leur publication, aucun élément nouveau n'est venu remettre en cause leurs principales conclusions. Cependant, s'agissant des méthodologies, stratégies et processus de décision sur le sujet, des progrès ont été accomplis et les points de vue ont évolué. Dans cet ouvrage, le RWMC exprime, de manière concise, son opinion collective sur les raisons pour lesquelles le stockage géologique demeure une solution appropriée pour la gestion des déchets les plus dangereux et à vie longue. Il précise également l'état d'avancement des réflexions sur le stockage géologique, les défis et avantages de sa mise en œuvre ainsi que les attentes concernant les futurs développements.

Réglementation de la sûreté à long terme du stockage géologique

Vers une compréhension commune des objectifs principaux et des fondements des critères de sûreté

ISBN 978-92-64-99048-7. 88 pages. Gratuit : versions papier ou web.

La réglementation de la sûreté à long terme du stockage géologique des déchets radioactifs pose des défis particuliers en raison des vastes échelles de temps concernées. Ce rapport a été préparé afin de promouvoir une compréhension commune des objectifs fondamentaux et des critères de sûreté des dépôts en formation géologique profonde. Il indique des orientations importantes pour les programmes nationaux dont le développement ou le perfectionnement de la réglementation est en cours. Une compréhension commune pourrait aussi aider à une communication plus claire et à une meilleure compréhension des critères réglementaires par le public.

Safety Cases for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand?

Symposium Proceedings, Paris, France, 23-25 January 2007

ISBN 978-92-64-99050-0. 424 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Législation nucléaire

Bulletin de droit nucléaire

ISSN 0304-3428. Abonnement 2009 : € 114, US\$ 150, £ 79, ¥ 16 500.

Considéré comme l'ouvrage de référence en la matière, le *Bulletin de droit nucléaire* est une publication internationale unique en son genre où juristes et universitaires peuvent trouver une information à jour sur l'évolution de ce droit. Publié deux fois par an en anglais et en français, il rend compte du développement des législations dans une soixantaine de pays. Il tient le lecteur informé de la jurisprudence, des décisions administratives, des accords internationaux et des activités réglementaires des organisations internationales, dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Sciences nucléaires et Banque de données

Analytical Benchmarks for Nuclear Engineering Applications ^{VO}

Case Studies in Neutron Transport Theory

ISBN 978-92-64-99056-2. 296 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Burn-up Credit Criticality Benchmark ^{VO}

Phase II-C: Impact of the Asymmetry of PWR Axial Burn-up Profiles on the End Effect

ISBN 978-92-64-99049-4. 512 pages. Gratuit : versions papier ou web.

International Evaluation Co-operation ^{VO}

Uncertainty and Target Accuracy Assessment for Innovative Systems Using Recent Covariance Data Evaluations (Volume 26)

ISBN 978-92-64-99053-1. 196 pages. Gratuit : versions papier (avec un CD) ou web.

Structural Materials for Innovative Nuclear Systems (SMINS) ^{VO}

Workshop Proceedings, Karlsruhe, Germany, 4-6 June 2007

ISBN 978-92-64-04806-5. 544 pages. Prix : € 110, US\$ 170, £ 79, ¥ 15 200.

Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators (HPPA5) ^{VO}

Workshop Proceedings, Mol, Belgium, 6-9 May 2007

ISBN 978-92-64-04478-4. 456 pages. Prix: € 100, US\$ 140, £ 72, ¥ 13 900.

VO = existe en anglais seulement.

Où acheter les publications de l'AEN

En Amérique du Nord

OECD Publications
c/o Turpin Distribution
The Bleachery, 143 West Street
New Milford, CT 06776
États-Unis
Tél. : 1 (800) 456 6323
Fax : 1 (860) 350 0039
E-mail : oecdna@turpin-distribution.com

Dans le reste du monde

OECD Publications
c/o Turpin Distribution
Pegasus Drive, Stratton Business Park
Biggleswade, Bedfordshire
SG18 8QB, Royaume-Uni
Tél. : +44 (0) 1767 604960
Fax : +44 (0) 1767 601640
E-mail : oecdrow@turpin-distribution.com

Commande en ligne :

www.oecd.org/bookshop

Paiement sécurisé par carte bancaire.

Où commander nos publications gratuites

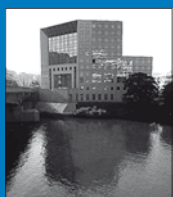
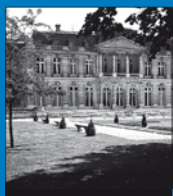
Service des publications de l'AEN
12, boulevard des Îles
F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
Tél. : +33 (0)1 45 24 10 15
Fax : +33 (0)1 45 24 11 10
E-mail : neapub@nea.fr

Visitez notre site internet : www.nea.fr



Offre d'emplois

Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire



L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire cherche régulièrement des candidats pour des postes dans les domaines suivants :

Économie de l'énergie
Sûreté nucléaire
Gestion des déchets radioactifs
Radioprotection
Économies de l'énergie nucléaire
Sciences nucléaires
Droit nucléaire
Ingénierie nucléaire
Informatique



Qualifications :

Diplôme universitaire pertinent ; expérience professionnelle de trois ans minimum ; excellente connaissance d'une des deux langues officielles de l'Organisation (anglais et français) et aptitude à bien rédiger dans cette langue ; bonne connaissance de l'autre langue.

Les postes sont ouverts aux candidats ressortissants des pays membres de l'OCDE. Dans le cadre de sa politique d'égalité des chances, l'OCDE encourage les femmes à faire acte de candidature.

Engagement initial :

Deux ou trois ans.

Traitement annuel de base :

De € 60 015 (Administrateur) et de € 86 053 (Administrateur principal), à quoi s'ajoutent des allocations selon la situation de famille et le lieu de recrutement.

Pour plus d'information concernant les offres d'emplois à l'AEN, consulter :

www.nea.fr/html/general/jobs/index.html

Radwaste Solutions

THE MAGAZINE OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND FACILITY REMEDIATION

Subscribe for 2009!

Radwaste Solutions is the magazine of radioactive waste management and facility remediation. In the United States, this business is centered on four industry subsets: (1) The U.S. Department of Energy's remediation of its weapons production and research facilities; (2) The U.S. DOE's civilian radioactive waste activities; (3) nuclear utilities, and (4) nonpower, non-DOE activities. In addition, other countries are also cleaning up and decommissioning their government nuclear facilities and their older nuclear power plants, and U.S. businesses are increasingly obtaining contracts and subcontracts to perform this work.

ANS Members: Receive a significantly discounted rate of \$45 (non-U.S. subscribers add \$36 for postage outside N. America). Call the Membership Department to **ADD YOUR SUBSCRIPTION** today: 1-708-579-8266 or -8217.

Nonmember/Corporate: If you are a nonmember, or would like a subscription for your company the cost is \$475, but that includes Class C Electronic Access as well! Call 1-708-579-8207 or subscribe online at www.ans.org/store/vi-RWS09.



A publication of the American Nuclear Society

2009 Editorial Feature Issues Include:

- Transportation
- Decommissioning and Decontamination
- Low-Level Waste
- Spent Fuel/High-Level Waste
- Environmental Remediation
- 5th Annual BUYERS GUIDE

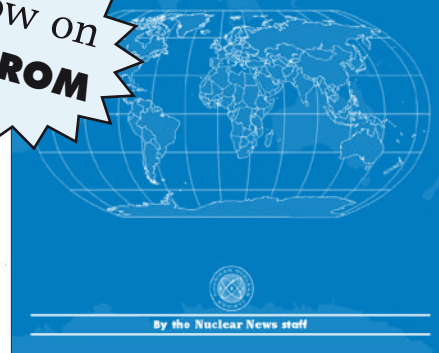
2008 World Directory of Nuclear Utility Management

TWENTIETH EDITION - 2008
WORLD DIRECTORY OF
**NUCLEAR UTILITY
MANAGEMENT**

Now on
CD-ROM

The twentieth edition includes:

- Worldwide plant listings, including operating plants and those under construction
- Addresses and more than 3,000 names of key nuclear utility personnel, both corporate and plant management
- More than a thousand changes from the 2007 edition
- Now available: utility listings on CD-ROM



To place an order, please mail check to **American Nuclear Society**,
97781 Eagle Way, Chicago, IL 60678-9770
PHONE: 708/579-8210 • FAX: 708/579-8314
E-MAIL: scook@ans.org • WEB: www.ans.org/store/vi-250041

American Express, MasterCard, Visa, and Diners Club accepted

\$300 PRINT EDITION ONLY / \$850 PRINT EDITION WITH CD-ROM



Les Éditions de l'OCDE, 2 rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
ISSN 1605-959X