

Tendances de l'énergie nucléaire

Développement de l'énergie nucléaire

Au 31 décembre 2003, les pays membres de l'OCDE comptaient 351 réacteurs en exploitation, soit environ 84 % de la capacité de production électronucléaire mondiale, et près de 23 % de la production totale d'électricité des pays de l'OCDE (voir tableau). En 2003, un réacteur (960 MWe nets) a été mis en service en Corée, mais six réacteurs ont été mis à l'arrêt (988 MWe nets), tandis que deux tranches étaient remises en service au Canada après un arrêt prolongé. Six tranches d'une puissance nette d'environ 6,4 GWe étaient en construction dans les pays membres de l'OCDE. En 2003, 17 tranches ont été provisoirement arrêtées au Japon pour des inspections après la découverte de problèmes dans le programme d'assurance qualité. À la fin de l'année 2003, six de ces tranches étaient de nouveau en service ; les autres doivent être connectées au réseau au cours de l'année 2004.

Le Japon et la Corée restent sur une dynamique de croissance en terme d'énergie nucléaire. La France de son côté reste très attachée à cette option. En 2003, elle a organisé un débat sur la politique énergétique, à l'issue duquel il a été recommandé de construire un réacteur avancé en France. La Finlande s'est engagée à construire une nouvelle centrale nucléaire en 2002, et a conclu, à la fin de 2003, un contrat pour la construction du réacteur à eau sous pression européen, l'EPR, dont la mise en service est prévue en 2009. Aux États-Unis, deux compagnies d'électricité ont déposé, pour deux centrales nucléaires, des demandes préalables de permis de construire, une procédure rapide mise en place par les pouvoirs publics pour encourager le déploiement de réacteurs avancés. Aux États-Unis également, la prolongation de la durée de vie et les augmentations de sa capacité installée sont des tendances

qui permettront à la longue de maintenir, voire d'augmenter, la capacité nucléaire, même si l'on ne construit pas de nouvelles centrales. Les autorités de sûreté des États-Unis prévoient de recevoir 46 demandes d'ici 2005, ce qui représentera l'équivalent de 1,6 GWe nets. Si le projet de redémarrer la tranche 1 de Browns Ferry (à l'arrêt depuis 1985) se concrétise, une augmentation de capacité sera donc prévue d'ici mai 2007.

D'autres pays membres de l'OCDE manifestent depuis peu un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire qui a le mérite d'assurer un approvisionnement en énergie stable, de contribuer à diversifier le parc, de réduire la dépendance nationale vis-à-vis du pétrole et du gaz importé et d'atténuer le risque de changement climatique. À cet égard, la Commission européenne a réaffirmé l'intérêt de l'énergie nucléaire à l'heure où l'Europe s'efforce d'atteindre ses objectifs d'émission de gaz à effet de serre. En 2003, les électeurs suisses ont rejeté deux motions qui auraient conduit à un abandon progressif de l'énergie nucléaire. Au Royaume-Uni, où les pouvoirs publics n'ont pourtant pas pris position pour ou contre les centrales nucléaires, la situation sur les marchés entraîne la fermeture précoce des centrales les plus anciennes et pourrait décourager la construction de nouvelles tranches.

Les gouvernements allemand, belge et suédois restent, par contre, engagés sur la voie de l'abandon de l'énergie nucléaire. Les pays qui ont opté pour la sortie du nucléaire se trouvent confrontés à des décisions difficiles car il leur faut trouver des sources d'énergie de remplacement pour satisfaire une demande d'électricité en hausse sachant qu'ils abandonnent une source d'énergie ne produisant pratiquement pas de dioxyde de carbone et doivent simultanément respecter leurs objectifs de réduction des émissions de carbone.

La déréglementation des marchés de l'électricité a bien avancé dans de nombreux pays membres, accélérant les regroupements et les fusions dans l'industrie au niveau international. Les pays de l'Union européenne sont parvenus à un accord concernant l'ouverture totale des marchés nationaux d'ici quelques années. Cette ouverture des marchés a incité bien des compagnies d'électricité à rechercher plus d'efficacité économique à travers une meilleure disponibilité, la prolongation de la durée de vie et l'augmentation de la puissance de leurs centrales. Ces deux dernières mesures sont apparues comme les moyens les plus efficaces, voire les moins coûteux, d'augmenter la production d'électricité sur les marchés libéralisés.

Dans une perspective à plus long terme, deux projets internationaux ont été lancés afin de développer la quatrième génération de systèmes nucléaires destinée à satisfaire les besoins futurs de la planète. Le Forum international Génération IV (GIF) et le Projet international sur les réacteurs nucléaires et cycles du combustible innovants (INPRO) préparent la technologie nucléaire de demain. Le plan de développement technologique des systèmes nucléaires de quatrième

Synthèse des données de 2003 sur l'énergie nucléaire
(au 31 décembre 2003)

| Pays | Réacteurs en service | Puissance installée (GWe nets) | Besoins en uranium en 2002 (tonnes d'U) | Pourcentage d'électricité nucléaire |
|---------------|----------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|
| Allemagne | 18 | 20,6 | 3 200 | 30,2 |
| Belgique | 7 | 5,8 | 845 | 41,5 |
| Canada | 22 ^(a) | 11,6 | 1 650 | 12,5 |
| Espagne | 9 | 7,5 | 1 530 | 23,6 |
| États-Unis | 104 | 98,8 | 22 701 ^(b) | 19,9 |
| Finlande | 4 | 2,7 | 538 | 25,5 |
| France | 59 | 63,6 | 8 570 | 77,6 |
| Hongrie | 4 | 1,8 | 373 | 37,1 |
| Japon | 52 | 43,9 | 8 154 ^(b) | 25,8 |
| Mexique | 2 | 1,4 | 156 | 5,9 |
| Pays-Bas | 1 | 0,5 | 63 | 4,0 |
| Rép. de Corée | 18 | 14,9 | 3 348 ^(b) | 39,9 |
| Rép. slovaque | 6 | 2,5 | 500 | 56,7 |
| Rép. tchèque | 6 | 3,8 | 730 | 55,5 |
| Suède | 11 | 9,4 | 1 600 | 49,2 |
| Suisse | 5 | 3,2 | 550 ^(b) | 39,4 |
| Royaume-Uni | 31 | 12,3 | 1 980 | 23,9 |
| Total | 359 | 304,1 | 56 488 | 23,2 |

(a) Cinq tranches, fermées depuis 1997, restent connectées au réseau, leur remise en service étant actuellement à l'étude.

(b) Données provisoires.

génération qui est sorti en décembre 2002 propose des programmes de R-D internationaux destinés à démontrer la faisabilité et les performances de six systèmes que les membres du projet ont jugé prometteurs en termes de durabilité, de sûreté et de fiabilité, d'économie, de résistance à la prolifération et de protection physique. Selon le calendrier proposé, établi dans l'hypothèse d'un renforcement de la collaboration internationale, les systèmes énergétiques de quatrième génération seraient sur le marché d'ici 2030.

Production d'uranium

En 2002 (données statistiques les plus récentes), l'extraction de l'uranium se limitait à quatre pays membres de l'OCDE. Cependant, deux de ces pays, le Canada et l'Australie représentent plus de 51 % de la production mondiale. Sur toute la zone de l'OCDE, cette production s'élevait à 20 114 tonnes d'uranium (t d'U) en 2002 et devrait baisser à 18 112 t d'U en 2003, en partie à cause des événements survenus au Canada où la mine de Cluff Lake a dû être fermée définitivement à la fin de l'année 2002 et où les opérations ont été suspendues à la mine de McArthur River du mois d'avril 2003 jusqu'en juillet de la même année en raison de l'inondation d'une partie de la mine.

À la fin de l'année 2002, la production mondiale d'uranium (36 042 t d'U) assurait environ 54 % de la totalité des besoins des réacteurs (66 815 t d'U). Pour le reste, on avait recours à des sources secondaires comme les stocks militaires et civils, le traitement de l'uranium et le réenrichissement de l'uranium appauvri.

D'après les projections actuelles, les capacités théoriques de production d'uranium des centres existants, commandés, prévus et envisagés, alimentés par des ressources classiques connues récupérables à des coûts inférieurs à 80 USD/kg d'U d'ici 2020, ne pourront satisfaire les besoins prévus en uranium dans le monde ni dans l'hypothèse basse ni dans l'hypothèse haute retenues pour la demande. De ce fait, on aura encore besoin des sources secondaires pour assurer l'approvisionnement à court terme. Cependant, comme ces sources secondaires devraient s'amenuiser, en particulier après 2020, il faudra augmenter les capacités de production existantes, construire d'autres centres ou adopter de nouveaux cycles du combustible pour satisfaire une part toujours plus grande des besoins des réacteurs. Étant donné les délais importants qu'il faut prévoir entre la découverte de nouvelles ressources et leur mise en production (de l'ordre de 10 à 20 ans, voire plus), on peut entrevoir une pénurie, avec son corollaire une forte pression à la hausse sur le prix de l'uranium, à mesure que les sources secondaires s'épuiseront.

Enrichissement

Plusieurs événements majeurs touchant à l'enrichissement de l'uranium sont survenus en 2003. La technologie de la centrifugation semble s'imposer comme la technique d'enrichissement de demain. Aux

États-Unis, l'*US Enrichment Corporation* (USEC) a cessé d'étudier la technologie par laser de même que la France a achevé ses recherches sur la technique SILVA, qui utilise également le laser, sans annoncer de plan de développement à moyen terme. Aux États-Unis, deux entreprises visent à créer une infrastructure commerciale d'enrichissement. L'une, financée par l'USEC, exploitera une technologie de centrifugation avancée dérivée de recherches publiques antérieures ; l'autre, de la responsabilité des *Louisiana Energy Services* (LES), exploite la technologie de centrifugation d'Urenco. L'USEC envisage de mettre en service en 2005 une installation de démonstration comportant jusqu'à 240 machines. LES prévoit une première mise en exploitation en 2006 pour atteindre la pleine capacité en 2011. En France, AREVA a pris des mesures pour acquérir la technologie de centrifugation en achetant 50 % du capital de la branche technologique d'Urenco, ceci afin de remplacer le jour venu son usine de diffusion gazeuse de Tricastin. En 2003, Urenco a également annoncé qu'il augmenterait de plus de 10 % sa capacité d'enrichissement par centrifugation.

Sûreté et réglementation nucléaires

Dans l'ensemble, la sûreté des centrales nucléaires des pays de l'OCDE reste excellente, comme le montrent de nombreux indicateurs de performance. Ces résultats sont le fruit des recherches entreprises. Tous s'accordent à reconnaître que la recherche en sûreté peut améliorer l'efficacité et l'efficacé du système réglementaire. Elle permet d'identifier les points les plus importants pour la sûreté, de prévoir les futurs défis pour les autorités de sûreté et, de cette manière, montre comment doivent être attribuées les ressources.

Plusieurs événements significatifs sont survenus en 2003. Le plus important s'est produit au mois d'avril à la centrale nucléaire de Paks, en Hongrie, où, lors d'une opération de nettoyage, 30 éléments combustibles ont été gravement endommagés. On a également signalé la dégradation d'une traversée de la cuve du réacteur à South Texas (États-Unis), une injection de sûreté intempestive qui a entraîné le fonctionnement répété d'une soupape de sûreté à la centrale de Dampierre-3 (France) et des fissurations des manchettes thermiques à Barseback-2. La réponse des centrales nucléaires aux pannes de réseau survenues en Amérique du Nord et en Europe au cours de l'année a été conforme aux attentes des exploitants.

Les problèmes de sûreté dus à de fausses manœuvres qui ont été révélés à l'occasion de ces incidents sont les suivants : lacunes dans les connaissances de l'opérateur, défauts des mécanismes mis en place pour tirer les enseignements des incidents précédents et procédures défectueuses. Parmi les causes possibles de ces incidents, on a évoqué également la culture de sûreté ainsi que les problèmes organisationnels tels que le recours aux sous-traitants, une définition insuffisamment claire des responsabilités ou de l'autorité en



AREVA, Cammeco, France

Fin 2002, la production mondiale d'uranium répondait à environ 54 % des besoins des réacteurs dans le monde, le reste étant assuré par des sources secondaires.

charge ainsi que l'autosatisfaction. Soucieuses d'améliorer toujours la sûreté nucléaire, dans les pays de l'OCDE comme ailleurs, les autorités de sûreté et de réglementation nucléaires des pays de l'OCDE ont pris les mesures nécessaires pour mettre au jour et résoudre ces problèmes. Elles ont ainsi lancé plusieurs projets communs de recherche.

Radioprotection

L'évolution du système de protection radiologique reste au centre des débats ; on note d'ailleurs une accélération des activités destinées à favoriser le consensus. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a largement diffusé, pour commentaires, deux documents-cadres décrivant sa conception du système global de protection radiologique et de la protection radiologique des espèces autres que l'homme. Les opinions des responsables des politiques de radioprotection, des autorités de sûreté et des praticiens commencent à converger même s'il faut admettre que de nouveaux débats et analyses seront nécessaires pour pouvoir appréhender pleinement les implications des recommandations de la CIPR. Il est clair toutefois que les différentes parties prenantes souhaiteraient voir conservés dans les nouvelles recommandations plusieurs concepts utiles dans la pratique et que la CIPR avait, dans un premier temps, pensé éliminer, à savoir les limites de dose, la dose collective et le principe ALARA. L'initiative de la CIPR pour recueillir l'opinion des diverses parties prenantes dans un esprit d'ouverture a été très appréciée. Ces dernières attendent d'ailleurs avec impatience la présentation par la CIPR de ses propositions de recommandations lors du Congrès de l'Association internationale de radioprotection qui aura lieu à Madrid, en Espagne, au mois de mai 2004.

L'état des infrastructures de radioprotection reste un sujet de préoccupation, qu'il s'agisse du nombre d'étudiants, de professeurs et de professionnels qualifiés ou de la situation des établissements et installations de recherche. Avec la déréglementation des marchés, il est devenu plus difficile de définir quelle doit être la politique de financement par l'État, quand bien même il s'agirait d'infrastructures publiques.

Enfin, conscients des risques d'attentats terroristes utilisant des bombes radiologiques, les gouvernements ont entrepris de vérifier que les structures et les mécanismes prévus pour les interventions en cas de crise sont capables de résoudre ce type de situations à la fois rapidement et de façon satisfaisante. D'autres sujets connexes, comme la possibilité d'intégrer la radiographie humaine à la panoplie de mesure de protection du public, apparaissent simultanément. Les études en cours sur la participation de la société civile aux décisions de radioprotection laissent penser que les populations concernées souhaiteraient être associées à la réflexion entreprise par les autorités

concernant les mesures de protection préventives ou consécutives à un incident.

Gestion des déchets radioactifs

Dans les pays qui se sont engagés dans d'importants programmes de stockage géologique, le calendrier prévu a été respecté en 2003. En Finlande et en Suède, ainsi qu'à Yucca Mountain, aux États-Unis, les travaux ont avancé sur des sites déjà choisis pour y construire des dépôts ou des sites pour lesquels l'accord des populations est en principe acquis. En France, un site de stockage de déchets de très faible activité est entré en service. L'aménagement d'un site spécialement conçu pour cette catégorie de déchets est emblématique de la politique très restrictive de la France aujourd'hui concernant les seuils de libération des substances radioactives.

La Belgique, la France et la Suisse ont publié des études majeures décrivant leurs travaux de recherche, de développement et de démonstration sur le stockage de déchets de haute activité et à vie longue. Ces études ont fait l'objet d'expertises internationales dont l'objectif est d'aider les établissements responsables à établir leurs futurs programmes et priorités de travail.

Les événements récents au Canada, en Allemagne et au Japon démontrent l'importance de la prise en compte des préoccupations des différentes parties prenantes dans les programmes de gestion des déchets et de la mise en place du cadre adéquat. Au Canada, la nouvelle loi sur les déchets de combustible nucléaire exige de la société de gestion des déchets nucléaires à but non lucratif créée par les propriétaires de déchets qu'elle organise des consultations avec le grand public. En Allemagne, le comité créé par les pouvoirs publics a proposé de nouveaux critères généraux de sélection des sites qui recouvrent des aspects géologiques et sociaux. Enfin, la société nationale de gestion des déchets japonaise NUMO a annoncé officiellement le lancement d'un appel à candidatures pour des travaux de reconnaissance préliminaire des sites où pourrait être aménagé le stockage de déchets de haute activité. En Italie et en Corée, les progrès ont été plus lents, car les propositions récentes des pouvoirs publics concernant l'implantation de stockage de déchets de moyenne activité se sont heurtées à une opposition très forte du public et ont dû être retirées.

Dans la plupart des pays dont les programmes de gestion des déchets de haute activité et à vie longue sont déjà bien avancés, des organismes techniques indépendants conseillent les gouvernements sur la conduite de leurs programmes de gestion des déchets. C'est la voie choisie au Royaume-Uni par le *Department for Environment, Food and Rural Affairs* (DEFRA) qui vient de créer le *Committee on Radioactive Waste Management* (CoRWM). Fin 2005, ce CoRWM doit faire connaître ses recommandations pour la mise en œuvre du programme 2001 du DEFRA, intitulé « *Managing Radioactive Waste Safely* ».



Le contrôle des doses radioactives est une part fondamentale de la protection des travailleurs de l'industrie nucléaire.

La majorité des pays membres de l'AEN ont choisi le stockage en formation géologique des déchets hautement radioactifs.



Lors d'une conférence importante organisée au mois de décembre à Stockholm (Suède) faisant le point des avancées politiques et techniques en matière de stockage en formations géologiques, des représentants des sociétés de gestion des déchets, des autorités de sûreté et des établissements de recherche ainsi que des décideurs des pays membres de l'AEN et de la Chine ont jugé que le stockage en formations géologiques était un aboutissement techniquement réalisable et acceptable du point de vue éthique et environnemental de la gestion des déchets radioactifs, garantissant par conséquent la sécurité et la sûreté de manière durable.

Sciences nucléaires

En sciences nucléaires, l'AEN a axé ses travaux sur l'amélioration du fonctionnement et des marges de sûreté des centrales nucléaires actuelles ainsi que sur la mise au point de la prochaine génération de systèmes de réacteurs. S'agissant des centrales actuelles, les principaux défis scientifiques proviennent de la prolongation de la durée de vie des réacteurs, de l'emploi de combustibles à plus haut taux de combustion et des possibilités de recourir aux techniques de séparation et de transmutation pour abaisser la radiotoxicité et le volume des déchets nucléaires. Parmi les futurs concepts de réacteurs, ce sont surtout les systèmes à spectre rapide et/ou à haute température qui ont été le plus étudiés.

La mise au point de nouveaux matériaux de structure et le comportement des matériaux existants concernent tant les réacteurs actuels que les futures filières. Il est important de bien connaître le comportement de ces matériaux après des années d'irradiation si l'on envisage de prolonger la durée de vie des réacteurs actuels ou de recourir à des combustibles à plus haut taux de combustion. Par ailleurs, de nombreux facteurs, dont le développement des nouvelles filières de réacteurs, incitent à étudier et à mettre au point de nouveaux matériaux capables de résister à de très hautes températures et à un rayonnement intense.

Le cycle du combustible, qu'il s'agisse de l'amont ou de l'aval, constitue un autre axe de travail majeur en sciences nucléaires. On envisage actuellement d'utiliser des combustibles contenant des actinides de nombre de masse élevé pour les transmuter dans des réacteurs rapides ou dans des systèmes hybrides. De nouveaux types de combustibles, comme les nitrures sont à l'étude. La voie pyrochimique de retraitement du combustible irradié connaît un regain d'intérêt.

Données nucléaires et logiciels

Avec la disparition d'installations expérimentales, il devient vital de posséder des outils de base fiables tels que les codes de calcul et les données nucléaires utilisés pour l'analyse et la prévision des phénomènes nucléaires. Il est manifeste, par ailleurs, que le partage

de ces outils facilite la mise au point, l'amélioration et la validation tant des modèles de calcul que des données nucléaires.

Avec l'augmentation constante de la puissance de calcul et les possibilités d'utiliser en parallèle des clusters de stations de travail, on est désormais en mesure de simuler progressivement des phénomènes physiques plus complexes et entre autres de modéliser des cœurs de réacteur entiers ainsi que le transport des rayonnements dans les matériaux. De même, il est possible aujourd'hui de recourir plus souvent aux méthodes de Monte Carlo et d'obtenir des précisions satisfaisantes après un temps de calcul raisonnable.

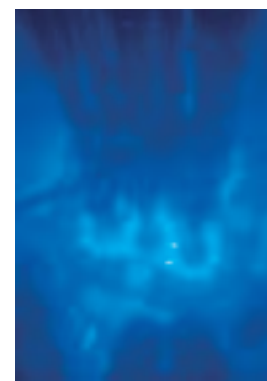
La précision des données nucléaires doit encore être améliorée, notamment sur les actinides majeurs et mineurs, si l'on veut pouvoir prévoir différents paramètres des réacteurs existants et éventuellement réaliser des économies. Ces données sont également nécessaires pour la modélisation des systèmes de réacteurs avancés, comme les systèmes incinérateurs d'actinides. Qui plus est, on a besoin de données nucléaires spécifiques pour la transmutation des déchets nucléaires, pour des applications médicales et astrophysiques. La mise au point de différents codes de modélisation statistique nucléaire permettra la prévision théorique des données nucléaires aux énergies intermédiaires.

Droit nucléaire

Pour la plupart des pays membres de l'AEN, l'harmonisation de leurs législations sur les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire reste une préoccupation importante qui pourrait d'ailleurs le devenir davantage pour ceux qui sont, ou qui vont devenir, membres de l'Union européenne, d'autant que les compétences législatives de l'Union s'étendent progressivement à la responsabilité pour les dommages nucléaires, à la sûreté nucléaire et à la gestion des déchets nucléaires et du combustible usé.

La modernisation et le renforcement des régimes nationaux et internationaux de responsabilité civile nucléaire répondent au besoin d'assurer une indemnisation suffisante et équitable des victimes dans l'éventualité d'un accident nucléaire. La révision de la Convention de Paris et de la Convention complémentaire de Bruxelles est révélatrice de la tendance observée dans les pays membres à relever le montant de l'indemnisation, à élargir le champ des dommages indemnifiables et à étendre à un plus grand nombre de victimes le droit à indemnisation.

La création d'un diplôme universitaire en droit nucléaire international à l'Université de Montpellier 1 en tandem avec l'École internationale de droit nucléaire vient confirmer une fois de plus l'intérêt de préserver, voire de renforcer, ce cursus spécialisé qui répond aux préoccupations des pays membres soucieux de préserver un enseignement de haut niveau dans les disciplines nucléaires, notamment en droit.



INEL, États-Unis

Vue du réacteur d'essai avancé au Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, aux États-Unis.