

L'énergie électrique produite par un assemblage combustible dans une centrale nucléaire équivaut approximativement à l'énergie produite par 3 500 tonnes de charbon dans une centrale classique. La photo de couverture montre des assemblages combustibles subissant un ultime examen avant leur installation dans la cuve du réacteur. Les chiffres les plus récents de l'AEN montrent que la part du nucléaire dans la production d'électricité dans la zone de l'OCDE atteint presque 21 pour cent.

Photo KWU

Comité de rédaction : Jacques de la Ferté,
Zabel Chéghikian, Neile Miller

Le *Bulletin de l'AEN* est publié deux fois par an, en anglais et en français, par l'Agence pour l'énergie nucléaire. Les opinions exprimées dans le *Bulletin* n'engagent que les auteurs des articles et ne reflètent pas nécessairement les points de vue du Secrétariat de l'AEN ou ceux des pays Membres. Les éléments d'information figurant dans ce *Bulletin* peuvent être librement utilisés, à condition d'en citer la source. La correspondance doit être adressée comme suit :

Secrétariat de rédaction
Bulletin de l'AEN
Agence de l'OCDE pour l'énergie
nucléaire
38, boulevard Suchet
75016 Paris, France
Télex : 630.668 AEN/NEA

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) a été créée le 20 avril 1972, en remplacement de l'Agence européenne pour l'énergie nucléaire. L'AEN comprend les 19 pays Membres européens de l'OCDE ainsi que l'Australie, le Canada, les Etats-Unis et le Japon. La Commission des communautés européennes (CCE) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) participent aux travaux de l'Agence.

L'objet de l'Agence est de promouvoir le développement des utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire grâce à des études et projets de caractère économique, technique et scientifique, et de contribuer à l'optimisation des politiques et pratiques de sécurité et de réglementation.

AEN

BULLETIN

Vol. 4, N°.1

Printemps 1986

Sommaire

Faut-il limiter la responsabilité de l'exploitant nucléaire ?
P. Reyners 3

La radioprotection des travailleurs dans l'industrie nucléaire
O. Ilari 7

Orientation des recherches sur la sûreté des réacteurs à eau ordinaire
K. Sato 10

Recherches sur l'évacuation des déchets radioactifs dans les fonds marins
B. Ruegger 13

Actualité AEN

Evaluation mondiale de l'offre et de la demande d'uranium 16

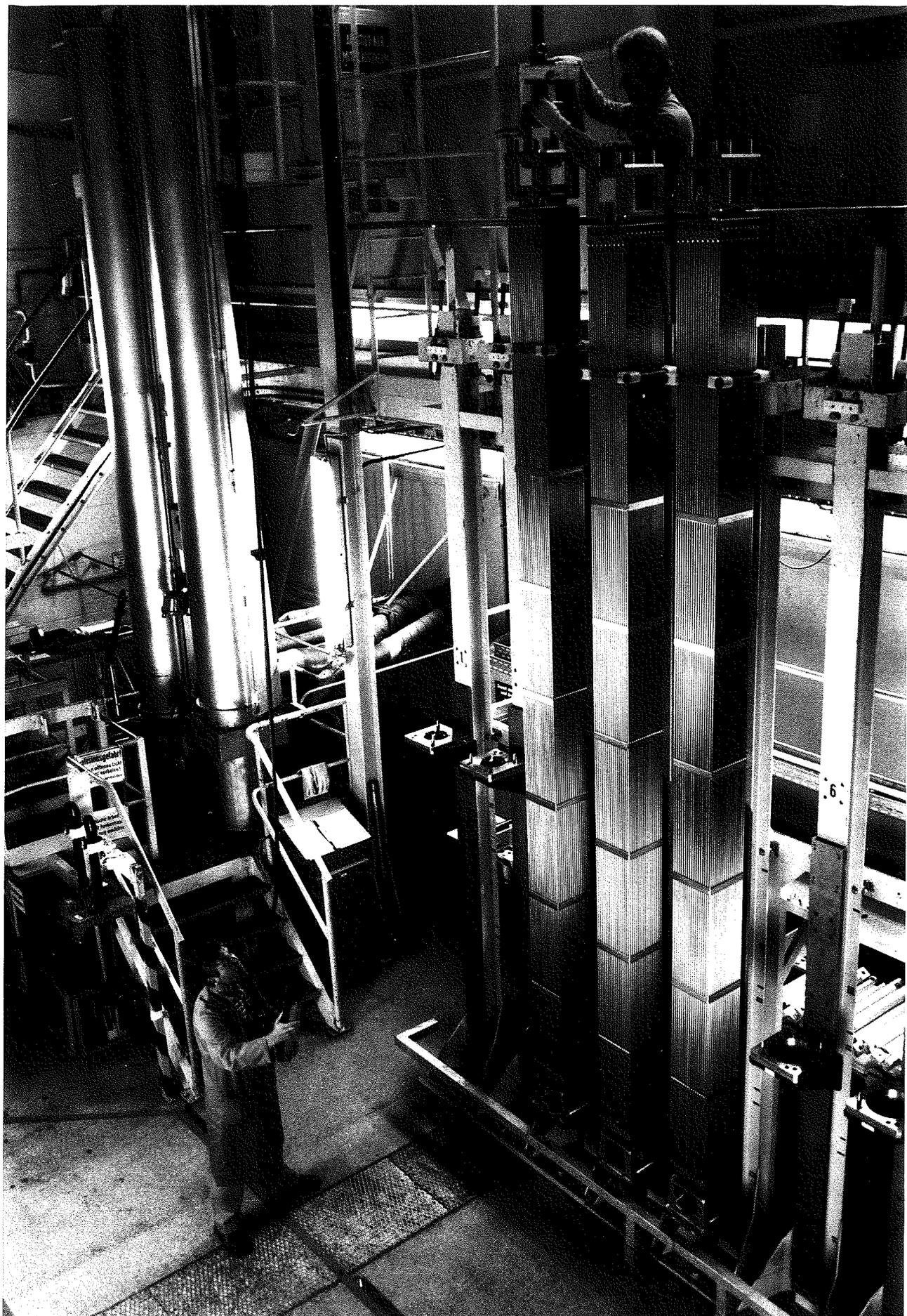
Les coûts du déclassement des grands réacteurs de puissance
J. Vira 20

Les coûts de production de l'électricité
M. J. Crijns 22

L'AEN examine les répercussions de l'accident de Tchernobyl 24

La situation de l'énergie nucléaire dans les pays de l'OCDE en 1985 25

Nouvelles publications de l'AEN 26



Les pays de l'OCDE qui utilisent l'énergie nucléaire se sont dotés depuis de nombreuses années d'un régime de responsabilité civile qui garantit l'indemnisation des victimes en cas d'accident nucléaire.
Photo KWU

Faut-il limiter la responsabilité de l'exploitant nucléaire ?

P. Reyners

L'élaboration d'un régime spécial de responsabilité pour les exploitants d'installations nucléaires se situe à la fin des années 50, avec, comme étapes successives, l'adoption dans le cadre européen de la Convention de Paris (1960), suivie de celle de la Convention Complémentaire de Bruxelles (1963) et, au plan mondial, de la Convention de Vienne (1963 - AIEA). Ce régime jouit à présent d'une large adhésion et il s'inscrit dans les législations nationales de la plupart des pays qui se sont dotés d'un programme électronucléaire. Les principes novateurs sur lesquels il repose nous sont désormais familiers et ils ont été mis en oeuvre depuis dans un certain nombre d'autres secteurs de technologies à risque.

Ces mêmes principes, et tout particulièrement celui d'une responsabilité à la fois objective et limitée de l'exploitant nucléaire, n'ont du reste guère alimenté les controverses qui accompagnent le développement de l'énergie nucléaire ; cela s'explique sans doute par le fait qu'en quelque vingt-cinq ans aucun accident n'a entraîné de conséquences notables hors site, jusqu'au récent accident du réacteur de Tchernobyl en Union soviétique ; les mécanismes d'assurance et d'indemnisation des dommages nucléaires n'ont par conséquent jamais été réellement mis à l'épreuve.

Cependant, par suite de développements récents, le "consensus" dont bénéficiait ce régime se trouve remis en question sur l'un de ses points les plus fondamentaux : la limitation de la responsabilité de l'exploitant nucléaire. Le problème qui est posé par le retour à la responsabilité illimitée, décidé ou envisagé dans divers pays, dépasse en effet le cadre d'un simple réaménagement des normes juridiques. Il s'agit d'une question délicate et qui n'est pas sans conséquences économiques pour l'industrie nucléaire ; enfin, elle pourrait affecter la coopération internationale remarquable qui s'est instaurée dans ce domaine.

Tout en soulignant le fait que la réponse à cette question appartient en dernier ressort au législateur, il semble intéressant d'essayer de faire le point en examinant les divers arguments avancés à cette occasion et en s'efforçant de mesurer ses implications pour l'avenir du système de responsabilité civile nucléaire dans les pays de l'AEN.

L'érosion du consensus

La mise en place dans les années 50/60 de moyens de production massive d'énergie nucléaire posait un problème difficile à résoudre en termes d'assurance et de responsabilité : celui d'une activité présentant un risque dont la probabilité était extrêmement faible mais

dont le potentiel dommageable était en revanche considérable. Cette difficulté était d'autant plus délicate à maîtriser qu'à l'époque, l'étude des conséquences d'un accident nucléaire grave était encore insuffisamment poussée et les données actuarielles sur lesquelles se fondent les assureurs, quasi inexistantes. La solution a consisté à concilier les intérêts des victimes éventuelles et ceux de l'industrie nucléaire naissante, en apportant aux premières la certitude d'une indemnisation équitable et rapide et à la seconde le bénéfice de la sécurité juridique et financière. L'exploitant nucléaire, en renonçant aux moyens habituels de défense, acceptait ainsi d'être tenu exclusivement et objectivement responsable d'un éventuel accident nucléaire et de souscrire une garantie financière d'un montant fixé lui aussi par l'autorité publique ; en échange, il obtiendrait la limitation de sa responsabilité.

Dans les années qui suivent, l'action de coopération internationale qui avait porté sur la négociation des Conventions, se poursuit par la mise sur pied, au sein de l'AEN et de l'AIEA, de comités d'experts chargés d'étudier les modalités d'application et les questions d'assurance liées à la mise en oeuvre de ces conventions ; leur action se traduit — en Europe en particulier — par des progrès remarquables dans l'unification des législations nationales dans ce domaine.

L'exercice de réexamen approfondi de la Convention de Paris et de la Convention Complémentaire de Bruxelles conduit au sein de l'AEN à la fin des années 70 aboutit à la signature, le 16 novembre 1982, de deux Protocoles amendant l'une et l'autre des Conventions. Les modifications portent sur les points suivants : un changement technique qui consiste à substituer à l'unité de compte basée sur l'or, les droits de tirage spéciaux du Fonds monétaire international ; une augmentation des montants d'indemnisation des dommages nucléaires fixés par la Convention de Bruxelles ; diverses améliorations de plus faible portée découlant de l'expérience acquise au fil des années. Il est intéressant de relever qu'au cours des longues discussions qui ont précédé l'adoption des Protocoles, le principe de la limitation de responsabilité n'a pas été mis en cause par les Parties Contractantes.

Le succès global de l'exercice de révision des Conventions est cependant un peu terni par l'incapacité des pays intéressés de s'accorder sur une augmentation du montant de responsabilité de l'exploitant nucléaire, l'élévation du plafonds d'indemnisation ne concernant que les fonds publics. L'échec sur ce point va rapidement conduire certains pays à procéder de leur côté à un accroissement considérable des montants de responsabilité alors que d'autres s'en tiennent au minimum prévu par la Convention, ce qui se traduit par des distorsions sensibles des niveaux de garantie financière. Cette évolution négative, ne serait-ce que du point de vue de

P. Reyners est le Chef des affaires juridiques de l'AEN.

Responsabilité civile

l'harmonisation des régimes nationaux d'indemnisation, a peut-être aussi exercé une influence sur le débat relatif à la responsabilité illimitée.

Le Symposium international de Munich (septembre 1984) sur la responsabilité civile nucléaire et l'assurance fournit tout de même l'occasion de dresser un bilan dans l'ensemble très positif de l'application de ce régime. L'optimisme des participants se trouve toutefois tempéré par la mise en cause du principe de limitation de la responsabilité par la Loi suisse de 1983 sur la responsabilité civile en matière nucléaire ainsi que des projets législatifs équivalents en cours de préparation en République fédérale d'Allemagne.

Aujourd'hui, les projets allemands sont devenus réalité, posant ainsi le problème de la cohabitation en Europe de deux systèmes de responsabilité civile nucléaire. Avant de chercher à évaluer les conséquences de cette situation, examinons les raisons de cette évolution.

Le poids de la tradition juridique

Il est intéressant de noter que les deux pays qui viennent de réintroduire la responsabilité illimitée dans leur législation sont précisément ceux qui avaient manifesté à l'origine le plus de réticence sur ce point (conduisant même la Suisse à renoncer à ratifier les Conventions) ; il s'agit également de pays où l'industrie privée joue un rôle important dans le secteur nucléaire et dans lesquels la contestation de cette source d'énergie par une partie de l'opinion publique a été particulièrement vive. Comme il ne s'est pas produit d'accident nucléaire grave qui aurait révélé les insuffisances du régime de responsabilité civile nucléaire, les motifs d'un retour à la responsabilité illimitée en République fédérale d'Allemagne et en Suisse relèvent principalement de la philosophie juridique et de considérations de politique interne.

Dans l'un et l'autre de ces pays, une législation publiée dès 1959 et inspirée par le souci de protéger les producteurs d'énergie nucléaire contre des risques financiers excessifs, avait admis le besoin d'une limitation de la responsabilité de l'exploitant, s'écartant ainsi de la notion traditionnelle du droit civil selon laquelle la personne qui est responsable d'un dommage doit en répondre sur la totalité de ses biens. Reprenant quelque vingt ans plus tard l'étude de cette question, les parlementaires sont revenus sur leur position d'origine au motif que ni les performances excellentes en matière de sûreté à mettre à l'actif des installations nucléaires dans le monde entier, ni les intérêts économiques de l'industrie nucléaire, ne justifient plus désormais le maintien d'une dérogation aux règles habituelles de la responsabilité civile et d'un traitement "privilegié" d'une branche de l'industrie par rapport aux autres. Au contraire, l'abandon de la limitation de responsabilité permet de mettre davantage l'accent, par rapport au "compromis" d'origine sur lequel reposait la Convention de Paris, sur les droits des victimes éventuelles d'un accident nucléaire à une protection financière accrue ; dans le même ordre d'idées, ce changement semble de nature à favoriser une plus large adhésion du public au développement de l'énergie nucléaire. D'une façon plus générale, on constate dans chacun de ces pays, une tendance générale à supprimer les restrictions juridiques à la réparation des dommages. Dans le cas du nucléaire, une telle limitation

est ressentie comme une manifestation anachronique de la politique de promotion qui avait prévalu dans les années 50.

L'industrie nucléaire ayant de son côté fait preuve de "compréhension", le législateur a donc estimé qu'il n'y avait plus d'obstacle véritable à se ranger aux normes classiques de la responsabilité civile, hormis le problème posé par la conformité de l'introduction de la responsabilité illimitée à l'égard des dispositions de la Convention de Paris (rappelons que la Suisse constitue un cas particulier puisqu'elle n'est pas Partie à la Convention de Paris).

Les nouvelles législations allemande et helvétique (la loi allemande a été adoptée le 22 mai 1985) ne signifient pas pour autant un retour au droit commun. De la construction initiale reposant sur l'équilibre entre la responsabilité objective et "canalisée" sur l'exploitant nucléaire d'une part et, de l'autre, la limitation de cette responsabilité, subsiste le premier élément. Demeure également pour l'exploitant l'obligation de souscrire une garantie financière selon les conditions fixées par la loi et il est donc clair que celui-ci demeure assujéti à un régime "spécial" de responsabilité. Aucune des parties intéressées n'a du reste suggéré de revenir au droit commun, contrairement à certaines propositions introduites récemment aux Etats-Unis.

Le débat outre-Atlantique

Aux Etats-Unis, des dispositions sur la responsabilité civile nucléaire ont été introduites dès 1957, sous la forme d'un amendement à la loi sur l'énergie atomique (la législation Price-Anderson du nom des deux parlementaires qui en ont assumé la paternité). Ce système, dans ses grandes lignes, est analogue à celui des Conventions de Paris et de Vienne et prévoit lui aussi une limitation de la responsabilité, avec cette particularité que la première tranche d'assurance souscrite par l'exploitant nucléaire (actuellement 160 millions de dollars) est complétée par une seconde tranche constituée par une contribution solidaire de l'industrie nucléaire qui devrait être versée en cas de dommages dépassant le montant de l'assurance de base, à raison de 5 millions de dollars par réacteur en exploitation. Une garantie financière de l'Etat fédéral à concurrence de 560 millions de dollars était prévue à l'origine mais le montant cumulé des deux tranches dépasse d'ores et déjà ce niveau puisqu'il atteint les 650 millions environ.

La législation Price-Anderson, qui a été modifiée et prorogée à plusieurs reprises, vient à échéance le 1er août 1987, ce qui explique qu'une large discussion sur l'opportunité de maintenir la limitation de la responsabilité de l'exploitant nucléaire se soit également engagée de ce côté de l'Atlantique. Certaines des propositions législatives introduites devant le Congrès conduiraient à alourdir considérablement la charge financière de l'industrie au niveau de la deuxième tranche, tandis que d'autres sont en faveur de la suppression de la limitation de responsabilité ou même pour l'abrogation du régime spécial de responsabilité civile nucléaire.

Les arguments invoqués en ce sens sont en revanche assez semblables : le système actuel est contraire aux principes traditionnels du droit de la responsabilité civile et il accorderait à l'industrie nucléaire une

protection injustifiée par rapport aux autres branches de l'économie. Il se trouve même des avis pour soutenir que la limitation de responsabilité aurait un effet démobilisateur du point de vue de la sûreté nucléaire. A cela s'ajoute le fait que la tradition américaine de la libre concurrence et de la limitation de l'emprise du Gouvernement sur le fonctionnement de l'économie, se traduit davantage qu'en Europe par une certaine méfiance à l'égard d'un système qui fait appel à l'intervention de l'Etat fédéral dans la réparation des dommages. Les défenseurs de la législation Price-Anderson font valoir au contraire que ses dispositions sont équilibrées et qu'elles sont avantageuses pour les deux parties : les producteurs d'électricité et le public, tout comme pour l'Etat fédéral dont l'obligation de garantie financière est à présent de facto éteinte. D'autre part, il ne serait pas équitable selon eux que le Congrès décide de changer radicalement les règles sur la base desquelles les exploitants nucléaires s'étaient engagés à l'origine. Enfin, certains événements récents, comme la catastrophe de Bhopal, illustrent les conséquences très négatives pour les victimes que pourrait entraîner un retour pur et simple aux règles habituelles de la responsabilité quasi-délictuelle.

Il est trop tôt pour faire des pronostics sur la décision que prendra finalement le Congrès - probablement dans le courant de cette année - mais il est manifeste que celle-ci aura un impact non négligeable sur l'avenir de l'industrie nucléaire aux Etats-Unis.

Le pour et le contre

L'un des arguments les plus généralement invoqués à l'appui d'un retour à la responsabilité illimitée est celui de l'intérêt des victimes qui se verraient ainsi bénéficier de moyens d'indemnisation accrus. En réalité, il est permis de se demander si ce changement devrait modifier véritablement le sort des victimes. Responsabilité illimitée ne signifie pas et ne signifiera jamais réparation illimitée et il est douteux, en cas d'accident grave, que le patrimoine de l'exploitant (privé) qui sera fortement diminué - sinon anéanti - du fait de cet événement, suffise à augmenter considérablement la capacité d'indemnisation sauf si le produit de l'assurance de dommages aux biens - laquelle n'est pas obligatoire - devait être affecté à l'indemnisation des tiers. Si l'exploitant nucléaire est un organisme public ou para-public, c'est alors la collectivité nationale qui supportera le fardeau de la réparation et la question de la responsabilité limitée devient sous cet angle quelque peu théorique. De ce point de vue, l'objection peut-être la plus pertinente qui se puisse formuler à l'encontre de la responsabilité illimitée est l'impossibilité pratique - par manque de capacité disponible - de l'assurer au-delà des montants actuels.

Sur le thème de l'"injustice" supposée de la limitation de responsabilité, il importe aussi de dénoncer l'assimilation fréquente opérée entre celle-ci et la limitation des droits à l'indemnisation des victimes qui en résulterait, alors même que celle-ci est de règle dans de nombreux systèmes nationaux de protection sociale sans que le principe d'une réparation équitable en soit pour autant remis en cause.

A ces observations ajoutons que, dans l'hypothèse d'un accident catastrophique (en d'autres termes provoquant des dommages dépassant les fonds disponibles en vertu de la loi), il incombera en tout état de cause à l'Etat de prendre en charge une partie de la réparation au nom de la solidarité nationale. C'est à ce prix seulement

que sera réalisé l'objectif de l'indemnisation pleine et entière des victimes. Dans ces conditions, la vraie question ne réside pas dans une discussion des mérites comparés de la limitation ou non de la responsabilité mais plutôt dans la répartition de la charge financière entre l'exploitant et la société représentée par l'Etat. Sous cet angle, l'introduction de la responsabilité illimitée n'est pas sans s'apparenter à une clause de pénalisation ou de moralisation de l'industrie nucléaire ; elle ne devrait pas changer radicalement les données de la réparation des dommages nucléaires.

Il faut cependant admettre que les partisans de la limitation de responsabilité de l'exploitant nucléaire se trouvent un peu sur la défensive lorsqu'ils sont confrontés à une objection fréquemment émise par le public : puisque les installations nucléaires présentent un tel degré de sécurité, pourquoi faut-il avoir recours à une limitation de la responsabilité ? Répondre en substance que le risque d'un accident catastrophique, aussi minime soit-il, ne peut être entièrement exclu et la limitation des capacités de garantie financière justifie donc celle de la responsabilité de l'exploitant, n'est généralement pas perçue comme une explication très séduisante.

Un autre point faible de leur argumentation provient de ce que les montants fixés par les législations nationales, que ce soit aux Etats-Unis ou dans les pays européens Parties à la Convention de Paris, ont été à l'origine arrêtés de façon passablement arbitraire, faute de bases suffisamment crédibles d'estimation, et qu'en outre les processus de réévaluation de ces montants n'ont, dans l'ensemble, pas fonctionné de façon efficace.

Reste dans ce débat indécis à aborder un autre aspect de la question : quelle sera, à terme, l'incidence - en Europe particulièrement - de l'application simultanée de législations nationales fondées sur des principes différents sinon contradictoires ?

Préserver la cohésion du régime européen de responsabilité civile nucléaire

L'un des effets très positifs de la Convention de Paris est d'avoir permis la constitution en Europe occidentale d'une véritable communauté de pays qui pratiquent les mêmes règles de responsabilité et d'assurance nucléaire, favorisant ainsi les échanges économiques, les transports et réduisant les discriminations injustifiées entre les ressortissants de ces pays. Cette construction est de surcroît coiffée par un mécanisme de solidarité financière régi par la Convention Complémentaire de Bruxelles.

Les tendances centrifuges que révèlent les initiatives allemandes et suisses ont suscité de ce point de vue une certaine préoccupation. Sans doute, l'harmonisation du droit ne saurait être considérée comme une fin en soi mais la récusation de l'un des principes fondamentaux de la responsabilité civile nucléaire peut aussi avoir d'autres inconvénients plus sérieux. Se trouve ainsi posée la question de la compatibilité avec les engagements découlant de la Convention de Paris, tandis que des difficultés pourraient naître dans l'application de la Convention au niveau de la reconnaissance réciproque des garanties financières, notamment pour les transports. Enfin, à l'heure où nombre de Parties Contractantes sont engagées dans la révision de leurs lois en vue de la ratification

Responsabilité civile

des Protocoles de 1982, leur tâche risque de s'en trouver compliquée, retardant ainsi l'entrée en vigueur de ces Instruments.

Si, d'autre part, l'introduction de la responsabilité illimitée devait faire école, on s'orienterait alors vers une modification fondamentale du système actuel, ce qui mettrait à l'épreuve tout un secteur de la coopération internationale nucléaire.

Comme la position des autorités allemandes et suisses peut être considérée comme irréversible, le réalisme conseille sans doute aux autres Parties Contractantes de faire preuve de compréhension envers leurs partenaires afin de parvenir à un arrangement de nature à conserver souplesse et efficacité au système actuel. L'intérêt de l'avis que le groupe d'experts gouvernementaux de l'AEN devrait prochainement rendre sur ce point s'en trouve renforcé.

PRINCIPES DE BASE DE LA RESPONSABILITE CIVILE NUCLEAIRE

Convention de Paris (29 juillet 1960)

Un seul responsable : l'exploitant nucléaire

Rompant avec la tradition de la responsabilité pour faute commise, le système dit de responsabilité objective a pour effet de désigner par avance le responsable en cas d'accident au nom de l'idée que toute personne (l'exploitant nucléaire) qui exerce une activité dangereuse doit réparer les dommages qui en découlent, qu'elle ait ou non commis une faute. Les victimes se trouvent dispensées d'apporter la preuve de la faute, ce qui dans le domaine nucléaire, pourrait être une tâche aléatoire.

Le corollaire de la responsabilité objective est le caractère exclusif de celle-ci. Toute la responsabilité est donc (juridiquement) "canalisée" sur l'exploitant nucléaire, à l'exclusion, en particulier, des fournisseurs et autres co-contractants de l'exploitant.

Une double limitation de la responsabilité

La première limitation vise le montant de la responsabilité de l'exploitant nucléaire et elle apparaît comme une contrepartie de son caractère objectif. En vertu de la Convention de Paris, le montant maximum de responsabilité peut se situer entre un maximum de 15 millions de droits de tirage spéciaux du FMI et un minimum de 5 millions. La législation nationale peut néanmoins fixer un montant supérieur à 15 millions sous réserve de la garantie financière disponible.

En ce qui concerne la limitation dans le temps, la Convention stipule que les droits à réparation sont éteints si l'action n'a pas été introduite dans les dix ans suivant la date de l'accident nucléaire. Ce délai peut aussi être augmenté par le législateur en fonction des possibilités d'assurance.

Une garantie financière obligatoire

L'exploitant nucléaire est tenu de souscrire une assurance ou de constituer une autre forme de garantie financière pour un montant correspondant à sa responsabilité. La canalisation de l'obligation d'assurance correspond à celle de la responsabilité.

Un seul tribunal compétent

L'intervention d'un seul organe juridictionnel dont la détermination est effectuée selon les dispositions de la Convention, garantit le respect de la limitation de responsabilité et la répartition harmonieuse des indemnités. La Convention prévoit également l'exécution, dans les pays Contractants, des jugements définitifs rendus par le tribunal compétent.

La Convention de Paris a été modifiée par un Protocole Additionnel, le 28 janvier 1964. Elle est entrée en vigueur le 1er avril 1968. Un second Protocole d'amendement, en date du 16 novembre 1982, n'est pas encore devenu applicable.

Convention Complémentaire de Bruxelles (31 janvier 1963)

Cette Convention Complémentaire à la Convention de Paris institue un système de réparation comportant trois échelons. La première tranche d'indemnisation est couverte par la garantie fournie par l'assurance de l'exploitant ou une autre garantie financière au titre de la Convention de Paris. En règle générale, le plafond fixé pour cette première tranche se situe, suivant la législation nationale considérée, entre 5 et 15 millions de DTS. La seconde tranche allant du montant de la responsabilité de l'exploitant jusqu'à 70 millions de DTS est couverte par le gouvernement du pays où est située l'installation de l'exploitant responsable. La troisième tranche, qui couvre les dommages compris entre 70 et 120 millions de DTS, est fournie conjointement par les pays Parties à la Convention, en fonction d'une clé de répartition basée sur le produit national brut et la puissance thermique des réacteurs situés sur le territoire de chacune des Parties Contractantes.

La Convention Complémentaire de Bruxelles a été modifiée elle aussi par un Protocole Additionnel, le 28 janvier 1964. Elle est entrée en vigueur le 4 décembre 1974. Un second Protocole d'amendement, en date du 16 novembre 1982, n'est pas encore devenu applicable.

(Pour un tableau des ratifications aux Conventions de Paris et de Bruxelles, se reporter au Rapport annuel d'activité de l'AEN, 1985).

La radioprotection des travailleurs dans l'industrie nucléaire

O. Ilari

Durant les premières décennies de l'application de la protection radiologique, on se préoccupait surtout de la protection des travailleurs sous rayonnement. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale et l'introduction des applications industrielles de l'énergie nucléaire que la protection des personnes du public contre les rejets normaux et accidentels d'effluents radioactifs a retenu l'attention et qu'elle a commencé à faire l'objet de mesures de caractère pratique et réglementaire. Cette préoccupation s'est amplifiée au cours des deux dernières décennies au point de reléguer la protection des travailleurs à un rôle relativement secondaire dans les sujets de préoccupation des exploitants nucléaires et, surtout, des autorités compétentes en matière de réglementation.

Ce déplacement du pôle d'intérêt en protection radiologique se fonde sur deux faits. D'une part, on a réalisé des progrès considérables dans la réduction des radioexpositions professionnelles et les cas de conditions de travail inacceptables du point de vue de la radioprotection ont diminué de façon spectaculaire. Parallèlement, l'état encore rudimentaire des techniques de surveillance de la radioactivité et de gestion des déchets radioactifs et la sensibilité croissante du public aux incidences de l'énergie nucléaire sur l'environnement ont incité à concentrer les efforts et les ressources sur la réduction des risques d'exposition du public aux rayonnements. Cette évolution a eu pour effet de détourner l'attention de certaines conditions de travail peu satisfaisantes, où aucune amélioration n'a été constatée du point de vue de la radioprotection au cours de ces dernières années, et où l'on a même observé, dans certains cas, une augmentation progressive du niveau d'exposition des travailleurs.

Réduction des doses d'irradiation

Il ne fait pas de doute que la protection des travailleurs dans l'industrie nucléaire est convenablement assurée, mais il y a encore certains groupes de travailleurs dont les niveaux d'exposition individuels se rapprochent souvent des limites de dose réglementaires. Les doses collectives de ces groupes sont souvent importantes et elles ont tendance à augmenter avec les années. Ces groupes de travailleurs critiques sont ceux qui sont employés dans des mines d'uranium et ceux qui sont affectés à la maintenance des installations nucléaires.

La radioexposition des travailleurs dans les mines d'uranium résulte de la combinaison d'une exposition externe et d'une irradiation interne par inhalation de fines poussières et, en particulier, de produits de décroissance du radon et du thoron gazeux. Les doses d'irradiation reçues par ces travailleurs sont en général fort élevées et les cas dans lesquels la limite de dose annuelle est

dépassée ne sont pas rares. Une récente étude exécutée en France montre que si l'on introduit dans les réglementations nationales les limites plus rigoureuses visant l'exposition aux produits de décroissance recommandées au plan international, la dose individuelle annuelle délivrée aux travailleurs employés dans des mines souterraines représenterait, en moyenne, 60 pour cent environ de la limite de dose et qu'il y aurait, en moyenne, de 10 à 20 pour cent de cas où la limite de dose annuelle serait dépassée pour l'ensemble de la main-d'oeuvre employée. Cette situation n'est manifestement pas satisfaisante et des mesures correctives sont nécessaires. Celles-ci consistent essentiellement à accroître l'efficacité des systèmes d'épuration des gaz et de ventilation dans les mines et à améliorer la surveillance de l'atmosphère des mines, les techniques de dosimétrie individuelle et de protection personnelle.

Dans le cas des installations nucléaires, en particulier dans les réacteurs de puissance, on a observé depuis plusieurs années un accroissement progressif des doses tant individuelles que collectives et ce n'est qu'au cours de ces dernières années que leur niveau a commencé à se stabiliser. D'importantes disparités sont relevées entre les pays et entre les réacteurs, et les raisons en sont analysées au plan national aussi bien qu'international. L'AEN procède actuellement à une étude approfondie des répercussions que les prescriptions en matière de sûreté nucléaire ont sur la radioexposition professionnelle dans les centrales nucléaires, montrant que les doses individuelles et collectives les plus fortes sont reçues par des groupes de travailleurs chargés d'opérations de maintenance.

Si le problème de la radioexposition professionnelle dans les centrales nucléaires devait gagner en importance, comme cela a été le cas durant les dix dernières années, il pourrait constituer un goulot d'étranglement qui limiterait le développement de l'énergie nucléaire. Cela explique pourquoi l'industrie nucléaire consacre encore d'importants efforts à l'analyse des facteurs et des paramètres critiques d'exposition et à la recherche de moyens permettant de réduire la radioexposition des travailleurs. Il existe de nombreux domaines dans lesquels des mesures correctives sont possibles et ont déjà été appliquées avec succès. On peut les classer en quatre catégories :

- Diminution des sources de rayonnement par la réduction au minimum de la teneur en cobalt et des impuretés dans les matériaux de structure, ainsi que par un contrôle strict de la chimie et de la purification de l'eau du circuit primaire du réacteur ;
- Conception de l'installation et de ses systèmes de manière à séparer les sources d'irradiation, réduire la durée des interventions, faciliter les inspections, la maintenance et les réparations, etc ;

O. Ilari est le Chef-adjoint de la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN.

La radioprotection

- Mise au point d'un équipement spécial permettant des opérations de manipulation automatique ou à distance et de robots ;
- Amélioration des procédures d'exploitation et de la formation du personnel.

Le système de limitation des doses de l'ICRP

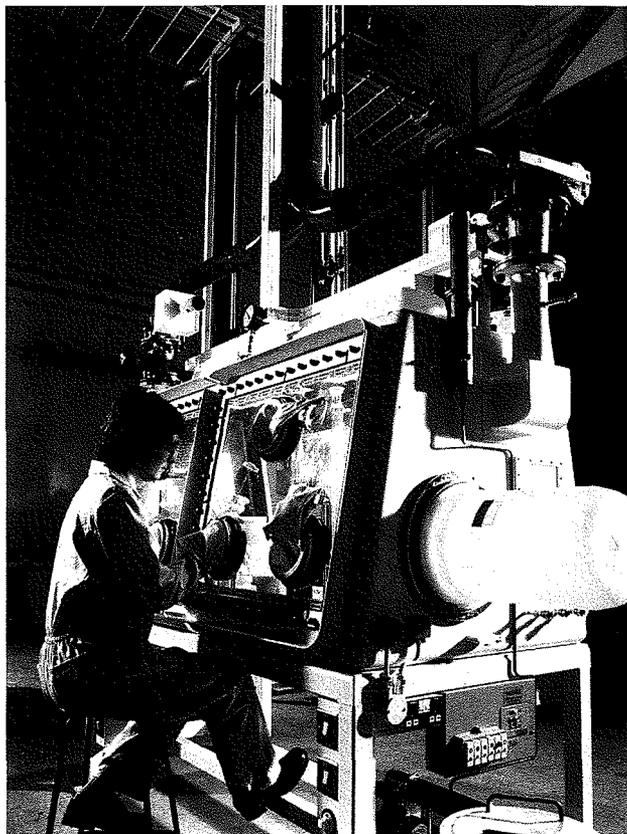
A ce stade, il convient de se demander si l'expérience acquise dans l'application du système de limitation des doses proposé par la CIPR en 1977 a été positive, si le système actuel de protection est satisfaisant, si l'on a jugé facile ou difficile de l'appliquer et ce que l'on peut prévoir à l'avenir dans le domaine de la radioprotection des travailleurs.

Il existe encore manifestement un fort degré d'hétérogénéité dans les niveaux de protection atteints pour les travailleurs exerçant différentes fonctions dans différents pays, et un effort notable sera nécessaire pour éliminer ou atténuer les pointes dans la distribution des doses entre les divers groupes de travailleurs. Ceci est en partie imputable à la complexité de certaines activités industrielles et à la difficulté intrinsèque d'introduire de nouvelles améliorations dans les niveaux de protection, tout en maintenant ces dernières dans des limites raisonnables de coût et d'efficacité opérationnelle. Il faut également en rechercher l'autre raison importante dans la méfiance et les hésitations avec lesquelles le principe fondamental de l'optimisation de la radioprotection, défini par la CIPR, a été reçu et appliqué par de nombreux exploitants industriels, par les syndicats, voire par les autorités chargées de la réglementation.

Optimisation de la radioprotection

Une grande diversité d'opinions ont été exprimées concernant l'optimisation de la radioprotection, appelée parfois concept ALARA (niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre), allant d'une conviction enthousiaste à un fort scepticisme concernant son applicabilité. En réalité, cet éventail d'opinions serait singulièrement rétréci si l'on reconnaissait que lorsqu'on parle d'optimisation, on a souvent à l'esprit des choses différentes.

Premièrement, il existe une grande diversité de situations auxquelles on peut envisager d'appliquer l'optimisation de la radioprotection. Celles-ci vont des stratégies globales applicables à une pratique donnée (telles que les stratégies de gestion des déchets ou les stratégies de production d'énergie) à l'examen des options en matière de conception pour un système complet de centrale nucléaire et, à un niveau plus détaillé encore, à la définition des options de conception pour un sous-système spécifique ou un composant aussi simple qu'une paroi de protection. En second lieu, les personnes et les compétences techniques et méthodologiques entrant en jeu dans la réalisation de l'optimisation à ces divers niveaux sont également différentes. Le processus d'optimisation peut être mis en oeuvre par des autorités gouvernementales, des équipes de conception ou des



Le laboratoire alpha du Centre nucléaire de Dounreay (Royaume-Uni) où sont effectuées des études sur la gestion des déchets radioactifs. Des normes rigoureuses de radioprotection sont appliquées pour limiter l'exposition professionnelle.
Photo UKAEA

techniciens individuels en radioprotection, selon le niveau auquel on se situe. C'est pourquoi, plutôt que d'exprimer un jugement général en la matière, il est préférable de reconnaître que la notion d'optimisation de la radioprotection est applicable dans des limites différentes et avec des degrés différents de complication et de quantification selon la situation considérée.

Une autre cause de malentendu tient à ce que les partisans aussi bien que les détracteurs du principe d'optimisation semblent admettre que la notion d'optimisation a été proposée comme un mécanisme automatique de décision fondé sur des techniques purement analytiques, plutôt que comme un élément entrant dans une approche plus large de la prise de décision. Il s'agit là d'une mauvaise interprétation. Le processus d'optimisation doit simplement être considéré comme un mécanisme destiné à aider à rationaliser la valeur et le poids à affecter à certains des facteurs de la prise de décision, notamment ceux qui intéressent la protection radiologique. On confond aussi parfois l'optimisation de la radioprotection avec l'analyse coûts-avantages, technique qui présente des limitations et des inconvénients manifestes et n'est pas toujours aisée à accepter pour des raisons éthiques, lorsqu'elle s'applique à la mise en balance des coûts et des détriments pour la santé. En fait, l'analyse coûts-avantages ne constitue que l'une des approches analytiques qui peuvent être utilisées comme aide à la décision.

Le degré de quantification dans les techniques utilisées pour l'optimisation de la radioprotection variera selon les différentes applications. Les concepteurs des installations et des systèmes de protection auront tendance à utiliser des techniques plus quantitatives pour décider du degré de protection qui répondra aux besoins de l'optimisation. L'optimisation de la radioprotection pendant l'exploitation tend à revêtir un caractère moins quantitatif. Dans ce cas, l'optimisation implique des décisions concernant un certain nombre de facteurs qu'il est difficile d'exprimer en termes quantitatifs. En revanche, des évaluations quantitatives de l'optimisation de la radioprotection ne sont pas nécessaires pour la pratique quotidienne. Les personnes responsables de la radioprotection au cours des opérations quotidiennes devront se conformer à des règles plus simples, imposées par l'autorité compétente ou la direction, sur la base du principe de l'optimisation. En outre, elles pourront être guidées par l'ambition générale d'optimiser la radioprotection, bien que ce soit d'une façon plus intuitive que quantitative. Cette attitude consistant à maintenir les expositions "au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre", n'est pas nouvelle en radioprotection et est encouragée par les recommandations actuelles, qui insistent simplement sur le fait qu'il n'est peut-être pas suffisant de travailler juste en dessous des limites de dose.

Si l'on considère l'avenir, on peut s'attendre à ce qu'il n'y ait pas, du moins pendant plusieurs années, de modifications radicales de la situation en matière d'optimisation de la radioprotection. Les techniques quantitatives d'optimisation occuperont une place bien définie dans le choix des principales options au niveau des stratégies et pratiques nationales (énergie nucléaire, gestion des déchets radioactifs, politique de santé publique, etc.) en utilisant des techniques de type multicritère, ainsi que dans le choix des options visant la conception des installations et des équipements, où des techniques analytiques ayant une portée plus étroite — telle que l'analyse coûts-avantages — trouveront un champ d'application utile. Parallèlement, la protection opérationnelle des travailleurs continuera à se fonder dans une large mesure sur une démarche prudente empreinte de bon sens, appelée "optimisation intuitive".

Les limites de dose individuelle

L'autre principe fondamental de la radioprotection, c'est-à-dire la limitation des doses individuelles, est presque universellement respecté. Les cas de dépassement de la limite de dose annuelle applicable aux travailleurs sont extrêmement rares et la grande majorité des travailleurs reçoivent des doses qui sont nettement inférieures à cette limite. Cette situation, qui en elle-même est satisfaisante, a été exploitée par certains groupes de pression pour réclamer une réduction de la limite de dose réglementaire. La raison d'être de cette requête est qu'une politique correcte de radioprotection ne paraît pas compatible avec le maintien de limites de dose nettement supérieures aux doses effectivement reçues par les travailleurs.

Le problème que soulève la proposition de réduire cette limite de dose tient à ce qu'elle ne prend pas en compte les activités "critiques" mentionnées plus haut, au cours desquelles il n'est tout simplement pas possible, actuellement et même dans un proche avenir, d'éviter que certains travailleurs soient exposés à des doses très proches des limites en vigueur. C'est pourquoi, il n'est pas réaliste de s'attendre à court terme à une réduction notable de la limite de dose individuelle applicable aux travailleurs — si l'on n'accepte pas une limitation radicale correspondante de ces activités — alternative qui ne semble pas réaliste non plus. Il faut reconnaître qu'une diminution de la limite de dose annuelle, qui pourrait augmenter le niveau de protection de la minorité de travailleurs qui sont les plus exposés, ne se traduirait pas par un avantage particulier au niveau de la protection de l'ensemble du personnel, celle-ci ne pouvant être améliorée que par l'application du principe ALARA.

En conclusion, pour que la situation actuelle concernant la radioexposition professionnelle puisse continuer à être considérée comme acceptable, il faut que le maintien de la limite de dose actuelle s'accompagne d'un effort sérieux et concret pour appliquer le principe d'optimisation de la radioprotection de toutes les manières praticables, que se soit à des fins quantitatives ou à des fins qualitatives.

Orientation des recherches sur la sûreté des réacteurs à eau ordinaire

K. Sato

L'un des facteurs qui ont été à l'origine des progrès remarquables réalisés par l'électronucléaire a été le niveau régulier de sûreté obtenu dans les pays de l'OCDE au niveau de l'exploitation des réacteurs et des autres installations nucléaires. Pour parvenir à ce résultat, on a fait une place considérable à la recherche sur la sûreté nucléaire, en s'efforçant d'accroître régulièrement les connaissances sur la manière d'assurer la sûreté afin de protéger le public et les travailleurs contre les risques de radioexposition.

Dans les pays de l'OCDE, les recherches en matière de sûreté ont été axées sur les réacteurs à eau ordinaire, que ce soit des réacteurs à eau sous pression ou des réacteurs à eau bouillante, car la majorité des réacteurs dans cette zone sont de ce type. Les recherches sur la sûreté des réacteurs à eau ordinaire remontent tout au début de la mise au point de cette filière, mais les travaux de recherche à grande échelle, menés de façon systématique, et au plan international n'ont effectivement démarré qu'au début des années 70 - époque à laquelle l'efficacité du système de refroidissement de secours du cœur a été sérieusement mise en question. L'expérience acquise à l'occasion de l'accident survenu en 1979 à Three Mile Island a clairement montré la nécessité de poursuivre les recherches dans de nouveaux domaines tels que les accidents sévères, le terme source et les facteurs humains.

Grâce aux travaux de recherche visant à assurer et à évaluer la sûreté de conception des réacteurs, de nombreux problèmes ont été résolus et une solution est en vue dans la plupart des cas pour les questions génériques qui subsistent. L'attention qui était concentrée sur la conception et la construction de nouvelles installations, se porte désormais vers l'exploitation continue et sûre des installations existantes et vers des améliorations d'ordre technologique et économique, reflétant en cela le nombre croissant d'installations en service.

Cette attention accrue portée à l'exploitation des centrales nucléaires plutôt qu'à leur construction, tout comme le fait que cette industrie a atteint un certain degré de maturité, ont entraîné une réduction de l'aide financière publique accordée au développement de l'énergie nucléaire et, dans certains cas, à la recherche sur la sûreté nucléaire.

Rôle des pouvoirs publics

Les rôles respectifs des pouvoirs publics et de l'industrie diffèrent dans les pays Membres de l'OCDE

s'agissant de sûreté. Toutefois, il semble que la caractéristique fondamentale soit la même : bien que les titulaires des autorisations soient principalement responsables de la sûreté d'exploitation des installations nucléaires, il appartient aux pouvoirs publics d'orienter et de contrôler les activités qui garantissent que les risques imputables à une telle exploitation sont maintenus à un niveau suffisamment faible. Les pouvoirs publics sont également compétents lorsqu'il s'agit de décider de l'acceptabilité des nouvelles technologies du point de vue de la sûreté. Même dans le cas d'une technologie parvenue à maturité, ce n'est pas une tâche aisée que de s'acquiescer d'une telle responsabilité.

Il va sans dire que les titulaires d'autorisations — c'est-à-dire l'industrie nucléaire — doivent conserver une capacité technique suffisamment élevée en entreprenant leurs propres programmes de recherche en matière de sûreté. Toutefois, cela ne signifie pas que les pouvoirs publics peuvent s'en remettre totalement à la technologie et aux activités de recherche de l'industrie. Les pouvoirs publics eux-mêmes doivent maintenir, renouveler et améliorer leurs propres compétences techniques, grâce à un flux continu d'informations nouvelles. Faute de le faire, les pouvoirs publics auront aisément tendance à faire preuve d'un excès de conservatisme et seront peu enclins à accepter de nouvelles propositions visant des technologies améliorées, en raison des risques inhérents à une prise de décision fondée sur une connaissance insuffisante du problème. Un flux continu d'informations exige des programmes permanents et cohérents de recherche en matière de sûreté, patronnés et contrôlés par les pouvoirs publics, ou du moins un accès satisfaisant à des sources d'information fiables et disponibles au plan international. Ces activités constituent, par conséquent, un aspect essentiel de la mission des pouvoirs publics.

Tout en maintenant et en améliorant leurs compétences techniques, les organismes publics doivent :

- anticiper les diverses questions de sûreté qui, sur la base de l'expérience passée, sont susceptibles de se poser, et être prêts à y faire face ;
- réagir avec compétence et de façon opportune si des problèmes de sûreté se posent ;
- Evaluer l'acceptabilité de nouvelles technologies qui, dans la plupart des cas, sont mises au point par l'industrie, et se prononcer à leur sujet ;
- Encourager les responsables de l'industrie et des pouvoirs publics à parvenir à un large consensus sur les questions de sûreté.

K. Sato est Directeur de la recherche en matière de sûreté des réacteurs au Centre de recherche de Tokai de l'Institut japonais de recherche atomique, et Vice-Président du Comité sur la sûreté des installations nucléaires de l'AEN.

Nécessité de maintenir le niveau de la recherche

Etant donné que de nombreuses questions de sûreté ont trouvé une solution, on peut se demander si des problèmes supplémentaires graves se poseront à l'avenir. La plupart des experts en matière de sûreté estiment que des questions surgiront inévitablement, principalement du fait de l'expérience d'exploitation. Dans le domaine des incidents et des accidents, il n'est pas possible de tirer des enseignements suffisants uniquement à partir de l'expérience acquise dans les installations. Il importe d'exploiter au mieux l'expérience accumulée, mais il est absolument indispensable de compléter les connaissances en prévoyant des travaux de recherche et des investigations sur les causes possibles de défaillance et sur les méthodes permettant de faire face d'une façon sûre à de tels événements.

On a soutenu que les programmes publics de recherche sur la sûreté ne devraient répondre qu'à des besoins spécifiques à mesure qu'ils se présentent. Mais ce type de démarche n'est ni efficace ni rentable, et peut même aller à l'encontre du but poursuivi, comme le montre l'expérience. En poussant les choses à l'extrême, cela pourrait impliquer que l'on doive fermer des centrales nucléaires chaque fois qu'une question grave se pose, jusqu'à ce que les travaux de recherche requis soient achevés. Etant donné qu'un arrêt prématuré peut coûter plus d'un million de dollars par jour, cette démarche n'est manifestement ni réaliste, ni compatible avec l'argument selon lequel l'énergie nucléaire constitue une source

d'énergie fiable. En outre, si la question revêt un caractère générique, toutes les centrales en cause devront être arrêtées. Cela n'est pas seulement une position indéfendable au plan économique, mais cela peut s'avérer également impossible dans les pays où l'électronucléaire représente une part dominante des approvisionnements en énergie.

Comme on l'a indiqué plus haut, il importe que les pouvoirs publics maintiennent et améliorent leurs compétences, en se tenant au courant des progrès techniques par un apport continu d'informations résultant de la recherche en matière de sûreté. Entreprendre un nouveau programme de recherche en partant de zéro n'est pas une mince affaire. Quand on a laissé s'étioler des compétences, il est difficile de les reconstituer lorsqu'elles sont à nouveau requises. Cela est particulièrement vrai dans le cas des questions de sûreté nucléaire, car leur solution nécessite habituellement des compétences étendues de caractère inter- ou multidisciplinaire. On a aussi souvent besoin de ressources matérielles, telles que des installations d'essai, des boucles thermohydrauliques, des programmes de calcul etc., dont l'assemblage et la mise en service peuvent demander du temps. Si l'on ne dispose pas d'une base de recherche sur laquelle on puisse fonder un nouveau programme de recherche, il faudra encore plus de temps et les coûts pourront s'en trouver notablement majorés. Il est donc essentiel que les pouvoirs publics maintiennent une capacité de recherche afin de pouvoir réagir rapidement et avec compétence et fournir la base technique requise pour les décisions. Un programme de recherche permanent offre le moyen de mettre au jour et de résoudre les problèmes avant qu'ils ne donnent lieu à une situation de crise. Les recherches en matière de sûreté devraient avoir un caractère continu et prospectif, et dépasser suffisamment la taille critique minimale requise pour maintenir et améliorer les compétences techniques des organismes publics compétents.



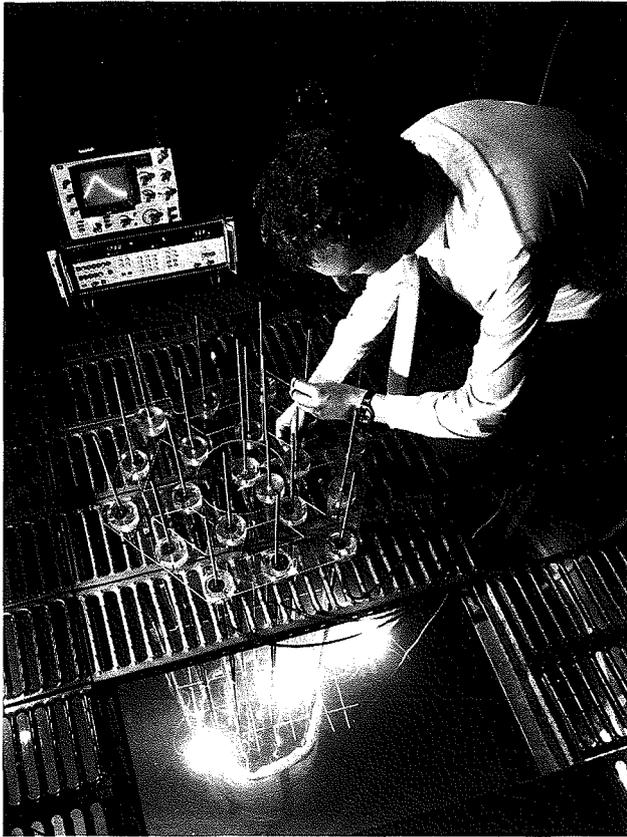
Installation de manutention du combustible au centre d'études techniques d'O-arai, au Japon. Des essais sont effectués pour évaluer le comportement du combustible dans les réacteurs surgénérateurs.

Photo PNC

Priorités pour l'avenir

Lors de sa session annuelle de 1984, le Comité de l'AEN sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN), a créé un groupe ad hoc chargé d'examiner les tendances actuelles de la recherche en matière de sûreté des réacteurs à eau ordinaire, et de définir des priorités en matière de recherche pour le proche avenir. Sur la base des considérations qui précèdent, ce groupe a formulé un certain nombre d'observations et de conclusions.

L'état actuel et les tendances de la recherche en matière de sûreté des réacteurs à eau ordinaire dans les pays Membres de l'OCDE reflètent la diversité des situations nationales concernant le développement de cette filière. Certains pays qui ont joué un rôle majeur dans le passé dans la recherche sur la sûreté des réacteurs à eau ordinaire, connaissent maintenant ou prévoient une baisse notable des budgets que les pouvoirs publics consacrent à la recherche. La taille du budget n'est bien entendu pas le seul indice permettant d'évaluer les activités de recherche sur la sûreté. Il se pourrait que la tendance générale dans le domaine de la recherche favorise des vérifications expérimentales de l'évaluation analytique du comportement de l'installation dans son ensemble ainsi que l'évaluation de l'expérience acquise



Configuration microphonique permettant la localisation de sources acoustiques dans le prototype de réacteur rapide au Centre nucléaire de Risley.
Photo UKAEA

en cours d'exploitation, au détriment des grands programmes expérimentaux (en particulier à des fins de démonstration). La diminution des budgets de certains pays pourrait être due en partie à cette évolution. Cependant, des amputations plus importantes ont été signalées dans plusieurs pays, suscitant la crainte que le niveau actuel de soutien financier accordé par les pouvoirs publics ne devienne insuffisant pour pouvoir faire face à leurs responsabilités futures. Les programmes de recherche définis par le groupe ad hoc devraient être menés de façon continue et cohérente, moyennant un soutien financier adéquat et en ayant recours, le cas échéant, à un partage des tâches et à une coopération au plan international.

Des travaux de recherche complémentaires sont nécessaires dans les cinq domaines principaux suivants :

- *Intégrité des structures et des composants*, notamment comportement et rendement du combustible, matériaux de structure et intégrité, examen non destructif, risques sismiques etc. Dans ce domaine, la prolongation de la durée de vie des centrales et les problèmes de vieillissement retiennent de plus en plus l'attention ;
- *Exploitation*, notamment les facteurs humains ainsi que la mise au point d'une instrumentation et d'analyseurs de centrale améliorés, l'analyse de l'expérience acquise en cours d'exploitation et le retour d'informations, etc. Un sujet qui est récemment apparu au premier plan des préoccupations vise la réduction des doses aux personnes professionnellement exposées, tout en maintenant le niveau actuel d'entretien et d'inspection des installations ;
- *Transitoires affectant les centrales*, qui nécessitent d'importantes ressources matérielles, telles que des boucles thermohydrauliques et des programmes de calcul. Il existe un besoin constant de moyens importants de ce type pour étudier les transitoires imprévus ;
- *Fiabilité et évaluation des risques*, en vue d'un développement et d'une utilisation plus large et plus systématique, l'accent étant mis sur le traitement des défaillances dues à des causes communes, l'élaboration de base de données sur la fiabilité et une modélisation et une évaluation plus poussées des incendies dans les centrales nucléaires ;
- *Accidents sévères*, l'accent étant mis sur la réponse de l'enceinte de confinement, le terme source, la reprise sous contrôle des accidents sévères et les conséquences sur l'environnement.

Enfin, l'importance du partage des tâches et de la coopération au plan international augmentera certainement à l'avenir, en partie par suite de restrictions budgétaires prévisibles dans les pays Membres. Au sein de l'AEN, le CSIN offre de nombreuses possibilités de coopération dans ce sens, notamment avec le système de notification des incidents (IRS), l'exécution de problèmes standards internationaux (PSI), l'organisation de réunions de spécialistes et de réunions de travail et le Projet LOFT de l'OCDE. Il conviendrait d'élargir encore ces activités afin d'assurer une coordination et une exploitation optimales des travaux de recherche consacrés à la sûreté des réacteurs à eau ordinaire.

Recherches sur l'évacuation des déchets radioactifs dans les fonds marins

B. Ruegger

La plupart des pays dotés d'un parc nucléaire mènent actuellement d'importants programmes de recherche en vue de mettre au point des solutions viables pour l'évacuation définitive des déchets de haute activité. Dans tous les pays, la préférence paraît aller à l'isolement des déchets dans des formations géologiques profondes et stables situées à l'intérieur des frontières nationales. L'évacuation sous les fonds marins, c'est-à-dire dans les couches géologiques qui tapissent le fond des océans, constitue à l'heure actuelle la seule autre solution étudiée.

L'objectif de l'évacuation sous les fonds marins est analogue à celui de l'évacuation dans les formations géologiques terrestres, c'est-à-dire isoler les radionucléides à longue période grâce à un système de confinement par barrières successives, dans lequel le milieu géologique joue le rôle de barrière principale.

On peut envisager toute une gamme de techniques de mise en place des déchets, telles que la mise en place par torpille de pénétration et la mise en place par forage. La méthode de mise en place par torpille de pénétration consiste à charger un ou plusieurs fûts de déchets de haute activité à l'intérieur d'une torpille spéciale, qui est ensuite transportée par bateau jusqu'au site d'évacuation. Cette torpille, qui peut peser plusieurs dizaines de tonnes, serait immergée à la verticale du site d'évacuation et s'immobiliserait dans les sédiments océaniques. D'après les prévisions fournies par les modèles mathématiques, la profondeur de pénétration dans les sédiments varie de 10 à 100 m suivant la conception de la torpille et les propriétés des sédiments. Une profondeur d'enfouissement de 30 à 40 m a été obtenue dans l'Océan Atlantique au moyen de torpilles de dimensions réduites.

Le forage de puits profonds sous le fond des océans est une méthode dont la validité a été démontrée dans le cadre de programmes non nucléaires au cours des vingt dernières années, et la technologie susceptible d'être utilisée pour la mise en place et la récupération des déchets radioactifs a, pour une large part, déjà été mise au point lors d'opérations de forage en mer à grande profondeur.

L'évaluation de la faisabilité technique de la mise en place des déchets sous les fonds marins, ainsi que la sûreté à long terme de cette méthode d'évacuation des déchets font l'objet d'un programme coordonné de recherches mené ces dix dernières années au sein du groupe de travail de l'AEN sur l'évacuation dans les fonds marins*.

B. Ruegger fait partie de la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN.

*Les pays Membres participant à ce programme sont les suivants : République fédérale d'Allemagne, Belgique, Canada, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suisse et la Commission des Communautés Européennes (CCE).

Campagne océanographique internationale

Plusieurs zones de la partie nord de l'Océan Atlantique, principalement situées dans les plaines abyssales, ont été étudiées en fonction d'une série de critères tels que la profondeur, l'uniformité de sédimentation, la très faible perméabilité, la stabilité tectonique et l'absence d'érosion. Deux zones ont été retenues comme offrant les perspectives les plus intéressantes, en particulier pour la solution de la torpille : la plaine abyssale de Great Meteor East (GME) située à l'est de l'Atlantique et la partie sud de la plaine abyssale de Nares (NARES) située à l'ouest de l'Atlantique. Cependant, la longueur et la qualité des carottes de sédiments prélevées dans ces deux zones au cours de différentes campagnes océanographiques ne présentaient pas les caractéristiques requises pour permettre la constitution d'une base de données satisfaisante, et il demeurait nécessaire d'obtenir des carottes non remaniées d'une trentaine de mètres de long afin de pouvoir évaluer et comparer correctement les deux zones.

En 1984, sur la base d'un programme scientifique établi par le groupe de travail sur l'évacuation dans les fonds marins, le Commissariat français à l'énergie atomique (CEA) a proposé d'organiser une campagne océanographique visant à prélever de longues carottes dans les zones de GME et de NARES. Il était prévu d'utiliser, pour cette campagne, un carottier à piston fixe (STACOR) qui avait été mis au point par l'Institut français du pétrole (IFP). Le financement de ce projet a été assuré, en dehors de la France, par les Etats-Unis, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Italie, le Japon et le Centre commun de recherches (CCR) d'Ispra de la CCE. Ces pays, de même que le Canada, ont aussi fourni des chercheurs et des équipements. Les Etats-Unis ont proposé d'embarquer à bord un carottier lourd supplémentaire, le carottier à piston de type avancé (ACP), et les Pays-Bas, un treuil supplémentaire pour la manutention d'un carottier léger à piston de type Kullenberg, d'un dispositif de prélèvement de l'eau interstitielle et d'un carottier-boîte.

L'importance du projet et des études prévues à bord du navire au cours de cette campagne, la nécessité d'embarquer à bord d'importantes équipes scientifiques chargées de procéder à des expériences sophistiquées et la nécessité de manipuler des carottiers lourds, longs et encombrants, obligeaient à recourir à un grand navire, stable en mer, doté d'une importante capacité de logement et apte à abriter un nombre considérable de conteneurs de laboratoire. Le CEA a choisi le navire de recherche Marion Dufresne, de l'Administration des terres australes et antarctiques françaises (TAAF), qui était le seul à remplir toutes ces conditions.

Campagne océanographique

En vue de la mise en oeuvre du projet et de la manutention des grands carottiers de sédiments, il a fallu apporter au navire Marion Dufresne un certain nombre de modifications importantes, qui ont notamment consisté à installer un nouveau treuil océanographique utilisant un câble Kevlar et à renforcer les moyens de manutention d'équipements lourds offerts par le navire. Le treuil océanographique, qui était de conception nouvelle, se composait de cinq poulies avec une charge maximale normale de 27 tonnes et une vitesse maximale supérieure à 2,4 m/s. Le câble Kevlar, dont le diamètre était de 29 mm, comportait une limite de rupture effective de 49 tonnes.

Il a également fallu installer à bord une quantité exceptionnellement élevée de matériels et d'équipements scientifiques :

- 18 conteneurs de laboratoire,
- un deuxième treuil (charge : 27 tonnes) sur un support spécial,
- un système de lance-torpilles,
- un laboratoire d'hydrologie chimique dans l'une des cabines, deux laboratoires à basse température et plusieurs autres laboratoires de plus petites dimensions.

Le navire de recherche Marion Dufresne a finalement quitté le port de Marseille le 11 juin 1985 avec, à bord, un effectif scientifique de 70 personnes, ainsi que neuf ingénieurs. La campagne a duré 41 jours.

Objectifs de la campagne ESOPE

La campagne ESOPE (étude des sédiments océaniques par pénétration) visait principalement à recueillir des données sur les dix premiers mètres de sédiments non consolidés dans les deux zones de GME et de NARES, afin d'évaluer leur capacité à confiner des radionucléides et de déterminer si ces régions se prêtent à l'évacuation sous les fonds marins du point de vue des exigences techniques et des prescriptions relatives à la sûreté.

Le programme scientifique de la campagne prévoyait des études géologiques et sédimentologiques des carottes, des études géochimiques axées notamment sur les caractéristiques de l'eau interstitielle et sur l'activité bactérienne et la détermination des propriétés géochimiques des sédiments. Le but était aussi de fournir des éléments de référence pour des expériences in situ à l'aide de torpilles et des corrélations avec la diagraphie géophysique. Il s'agissait d'étudier, en particulier, les failles détectées dans les sédiments supérieurs non consolidés à l'aide de méthodes géophysiques dans les deux zones de GME et de NARES, notamment en ce qui concerne leur rôle dans le mouvement des eaux interstitielles.

Travaux à bord du navire et premiers résultats

L'emplacement des carottages a été déterminé d'après les informations découlant de campagnes précédentes, qui avaient eu pour objet d'évaluer la nature des différents faciès de sédiments existant dans les zones

de GME et de NARES, de même que les caractéristiques de l'eau interstitielle dans certaines structures spécifiques, telles que les collines, les soubassements peu profonds, les discontinuités de type acoustique, etc.

Le lancement des torpilles équipées d'instruments a été conçu de manière à déterminer leur mode et leur profondeur de pénétration et à obtenir des informations sur les propriétés géomécaniques des sédiments. D'autres expériences in situ ont porté notamment sur l'établissement de profils sismiques multicanaux à l'aide d'un canon à eau, le prélèvement d'eau interstitielle, le prélèvement au moyen d'un carottier-boîte, l'établissement de profils de 3,5 kHz et un levé bathymétrique sur tout le trajet parcouru par le navire.

Les deux sites retenus pour la campagne ESOPE présentaient des caractéristiques différentes, d'où la nécessité de prévoir des carottiers d'une longueur de 35 m pour la zone de GME et de 25 à 30 m pour celle de NARES, leur poids étant de l'ordre de 7,5 à 8 tonnes. On a prélevé, dans la zone de GME, cinq carottes allant d'une longueur minimale de 18,90 m à une longueur maximale de 34,30 m et, dans la zone de NARES, 8 carottes d'une longueur comprise entre 17,30 m et 26,20 m. A deux exceptions près dues à des défaillances mécaniques, les carottes se sont révélées être d'une qualité exceptionnelle, le taux de récupération étant supérieur à 98 pour cent.

Deux programmes différents d'essais à l'aide de torpilles ont été exécutés au cours de cette campagne, l'un par un groupe français et l'autre par une équipe constituée conjointement par le Royaume-Uni et le CCR d'Ispra.

Les objectifs des expériences françaises étaient les suivants : (1) évaluer le comportement réel des torpilles dans la mer au cours de leur chute libre et dans les sédiments pendant la pénétration à une grande vitesse d'impact et (2) démontrer les possibilités pratiques d'utilisation de tels dispositifs pour évaluer les propriétés mécaniques générales des sols. L'une des torpilles lancées dans la zone de GME a atteint le fond de la mer à une vitesse de 53 m/s et a pénétré à une profondeur atteignant 40 m dans les sédiments. Dans la zone de NARES, la profondeur atteinte a été de 32,40 m et le contact avec le dispositif mis en place a été maintenu pendant six heures.

Les objectifs de l'expérience conjointe Royaume-Uni/CCR étaient assez analogues et consistaient à combler les lacunes existant dans la base de données nécessaire à l'élaboration de modèles prévisionnels, ainsi qu'à mettre au point un type nouveau et plus polyvalent d'instrumentation destinée aux torpilles et de système de communication avec ces dernières, notamment l'utilisation de satellites pour la transmission de données. Les torpilles testées, qui étaient de plusieurs conceptions différentes, utilisaient soit un système de variation de fréquence acoustique due à l'effet doppler, soit un transpondeur à faible fréquence pour la surveillance. Les résultats ont été très analogues à ceux obtenus par l'autre groupe, la profondeur de pénétration dans les sédiments variant de 16 à 34 m, suivant la conception de la torpille et les propriétés des sédiments.

En utilisant à proximité du fond un émetteur d'impulsions de 3,5 kHz, le groupe sur la géophysique cherchait à obtenir un enregistrement détaillé et, partant, une meilleure connaissance des failles décelées dans la zone de

GME. Il a effectué, aussi bien dans les zones de GME que de NARES, des levés sismiques à l'aide de canons à eau qui visaient tous à déterminer la nature exacte, voire l'origine, des failles.

Un système de 3,5 kHz a été maintenu dans l'eau pendant toutes les opérations de levé effectuées dans les deux zones. Plusieurs failles et structures du type faille ont été détectées sur les profils. Les données obtenues à 3,5 kHz ont aussi été particulièrement utiles pour déterminer la position exacte permettant de localiser les carottes longues sur des failles ou à proximité de ces dernières.

Le groupe sur la géologie était chargé de procéder à la réception, à l'étiquetage, à la diagraphie et à une analyse sédimentologique préliminaire des longues carottes obtenues au cours de l'expédition.

Le programme géotechnique mené à bord du navire était conçu pour (1) décrire les variations régionales d'ordre temporel et spatial observées dans les propriétés géotechniques des deux zones à l'étude, (2) déterminer les relations entre les processus géologiques et les propriétés géotechniques en milieu de plaine abyssale, (3) fournir des paramètres supplémentaires en vue d'améliorer les corrélations lithologiques et stratigraphiques sismiques, (4) permettre d'obtenir les données d'entrée requises pour les modèles servant à prévoir la profondeur de pénétration de la torpille, la fermeture de l'orifice et pour l'établissement d'une corrélation avec les données relatives à la décélération de la torpille et (5) fournir les informations requises pour l'amélioration et la vérification des modèles servant à prévoir la réponse dynamique des systèmes de prélèvement de longues carottes.

Le programme de géochimie, qui a été exécuté par 19 chercheurs, avait principalement pour objet d'étudier la chimie en phase dissoute et solide du site de mise en place à la fois dans les zones de GME et de NARES. Il était prévu de procéder à diverses analyses afin de recenser les processus physiques et chimiques susceptibles d'influer sur le transport des ions dans la colonne de sédiments. Celles-ci visaient spécifiquement à évaluer la chimie redox de la colonne de sédiments et à déceler l'apparition d'une advection d'eau interstitielle.

Analyse des données

La campagne ESOPE, qui a été l'une des plus grandes campagnes de recherche internationale jamais organisée, est manifestement une importante réalisation à porter à l'actif de la coopération internationale, puisqu'elle a bénéficié de la participation de 80 spécialistes appartenant à sept pays et à la CCE.

Son programme multidisciplinaire, qui mettait en jeu des expériences sophistiquées à l'aide des équipements prototypes les plus perfectionnés dont on dispose actuellement, en a fait un événement notable qui a suscité beaucoup d'intérêt dans la communauté scientifique. La carotte de 34,3 m de long de sédiments non remaniés prélevée dans l'eau à plus de 5 000 m est à ce jour un record pour l'Océan Atlantique.

De multiples données ont été recueillies et doivent être encore analysées. On s'attend à ce que les travaux dans les laboratoires participants se poursuivent pendant plusieurs années et contribuent ainsi à l'étude du procédé éventuel d'évacuation des déchets radioactifs dans les fonds marins.

Actualité AEN

Evaluation mondiale de l'offre et de la demande d'uranium

Depuis le milieu des années 60, l'AEN et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) évaluent périodiquement l'offre mondiale d'uranium. Maintenant publié tous les deux ans, le rapport intitulé *Uranium — Ressources, Production et Demande*, familièrement appelé "Livre rouge", est devenu un document de référence essentiel pour les planificateurs et les décideurs appartenant à la communauté nucléaire internationale.

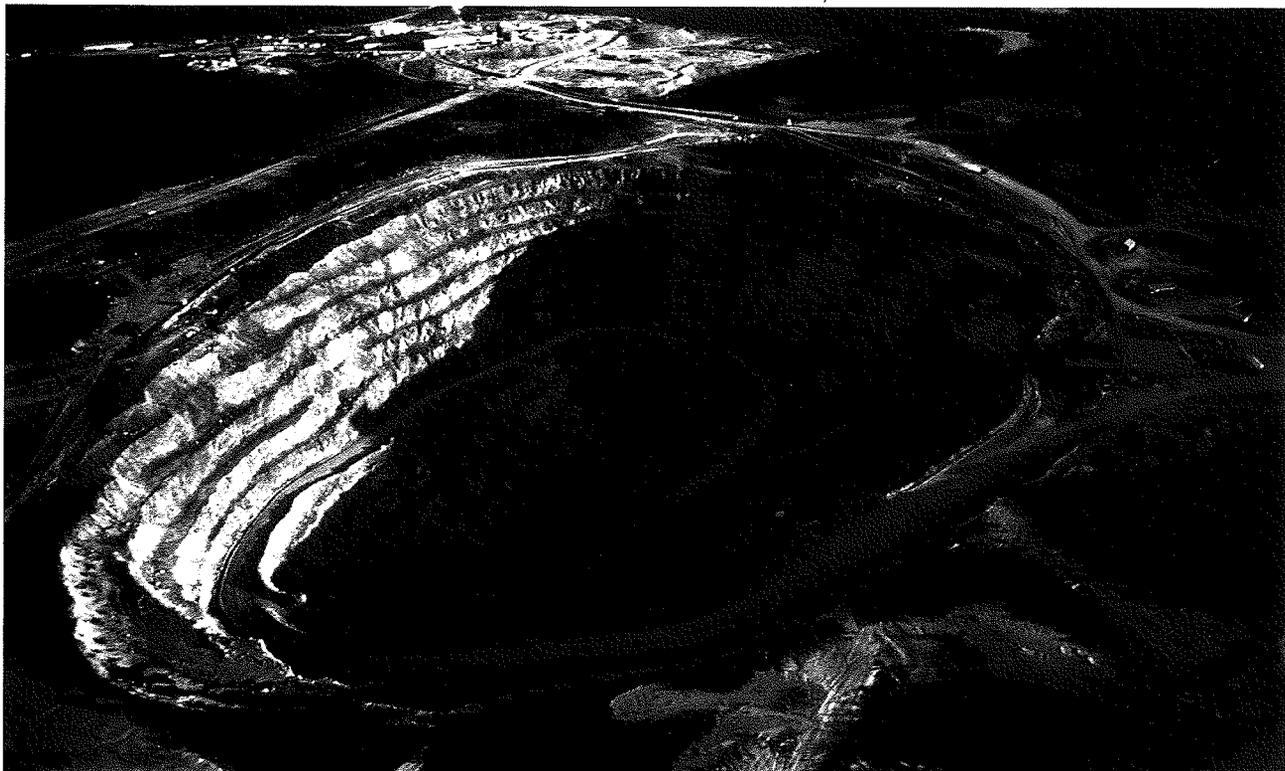
La onzième édition du Livre rouge, qui paraîtra prochainement, contient les résultats détaillés d'un examen de la situation de l'uranium effectué en 1985 dans plus de 50 pays du monde à économie de marché (MEM) et, notamment, des projections concernant l'offre et la demande futures d'uranium.

Depuis le début de l'ère commerciale, au milieu des années 60, la production de l'industrie de l'uranium dépasse régulièrement les besoins des réacteurs. Cette surproduction a conduit à un gonflement des stocks d'uranium, dont on estime qu'ils sont équivalents aux besoins des réacteurs pour les trois ou quatre années à venir. En 1985, bien que la capacité théorique de production soit restée supérieure à la demande, le niveau réel de production est tombé pour la première fois en dessous

des besoins estimés des réacteurs. En revanche, d'après les projections, les capacités théoriques de production à long terme devraient suffire pour répondre aux besoins projetés en uranium jusqu'aux environs de l'an 2000. Toutefois, en raison des longs délais qui s'écoulent entre la phase de prospection et le démarrage de la production dans de nouvelles mines, il importe de maintenir les activités de prospection pour faire en sorte que de nouveaux centres de production puissent être mis en exploitation quand le besoin s'en fera sentir.

Ressources en uranium

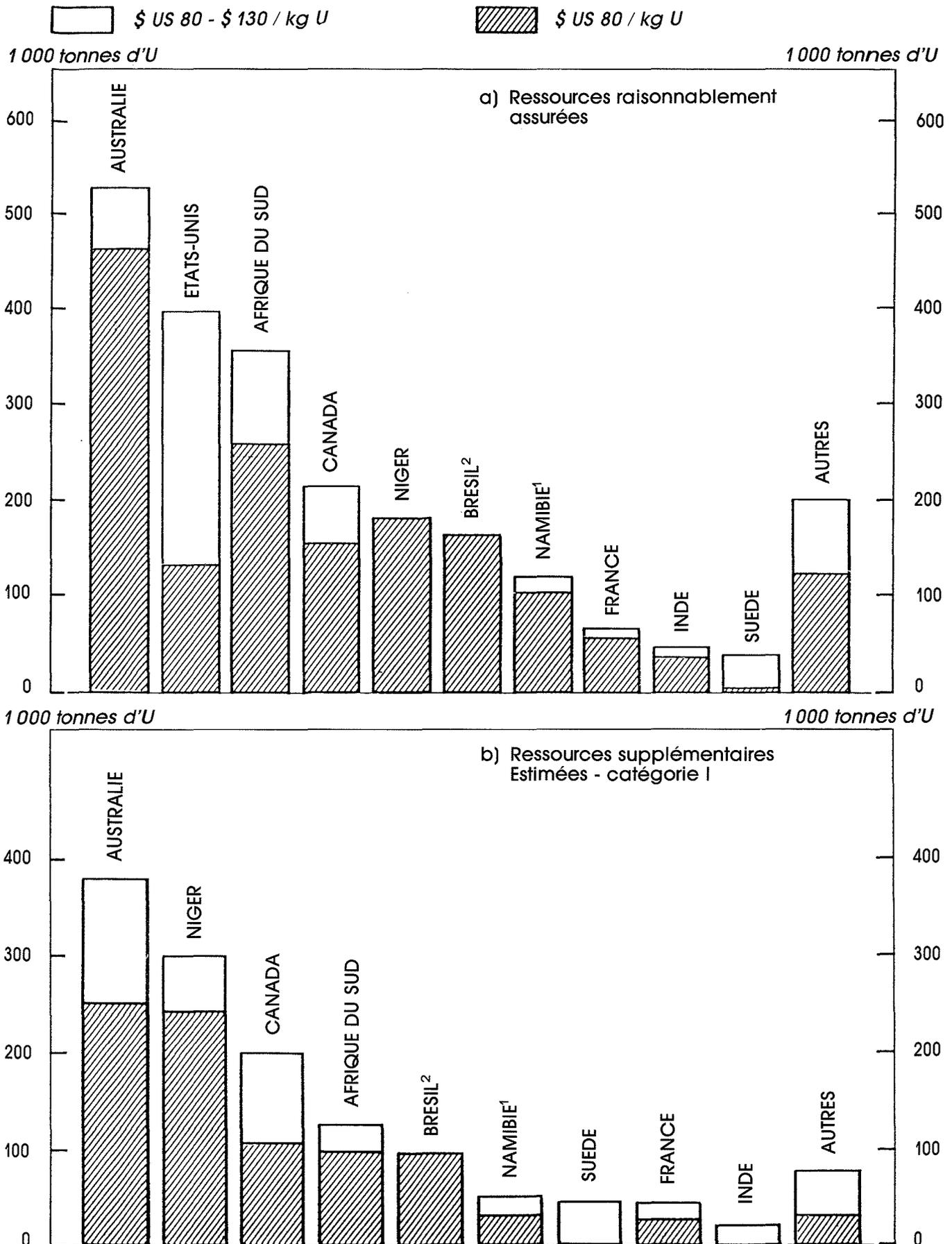
Les estimations relatives aux ressources en uranium se répartissent en quatre catégories distinctes, correspondant à des degrés différents de certitude quant aux quantités indiquées. Les Ressources Raisonnablement Assurées (RRA) correspondent à l'uranium qui se trouve dans la partie la mieux connue d'un gisement, tandis que les Ressources Supplémentaires Estimées (RSE) sont les ressources moins bien connues associées au même gisement. S'agissant des RSE, on établit une distinction entre la partie "découverte" et la partie "non découverte" en les subdivisant en Catégories I et II (RSE-I et



La production de l'industrie de l'uranium a constamment dépassé les besoins des réacteurs mais, en 1985, elle est tombée pour la première fois à un niveau inférieur à la demande.
Photo EAEL

Figure 1

Répartition des ressources en uranium dans le monde à économie de marché

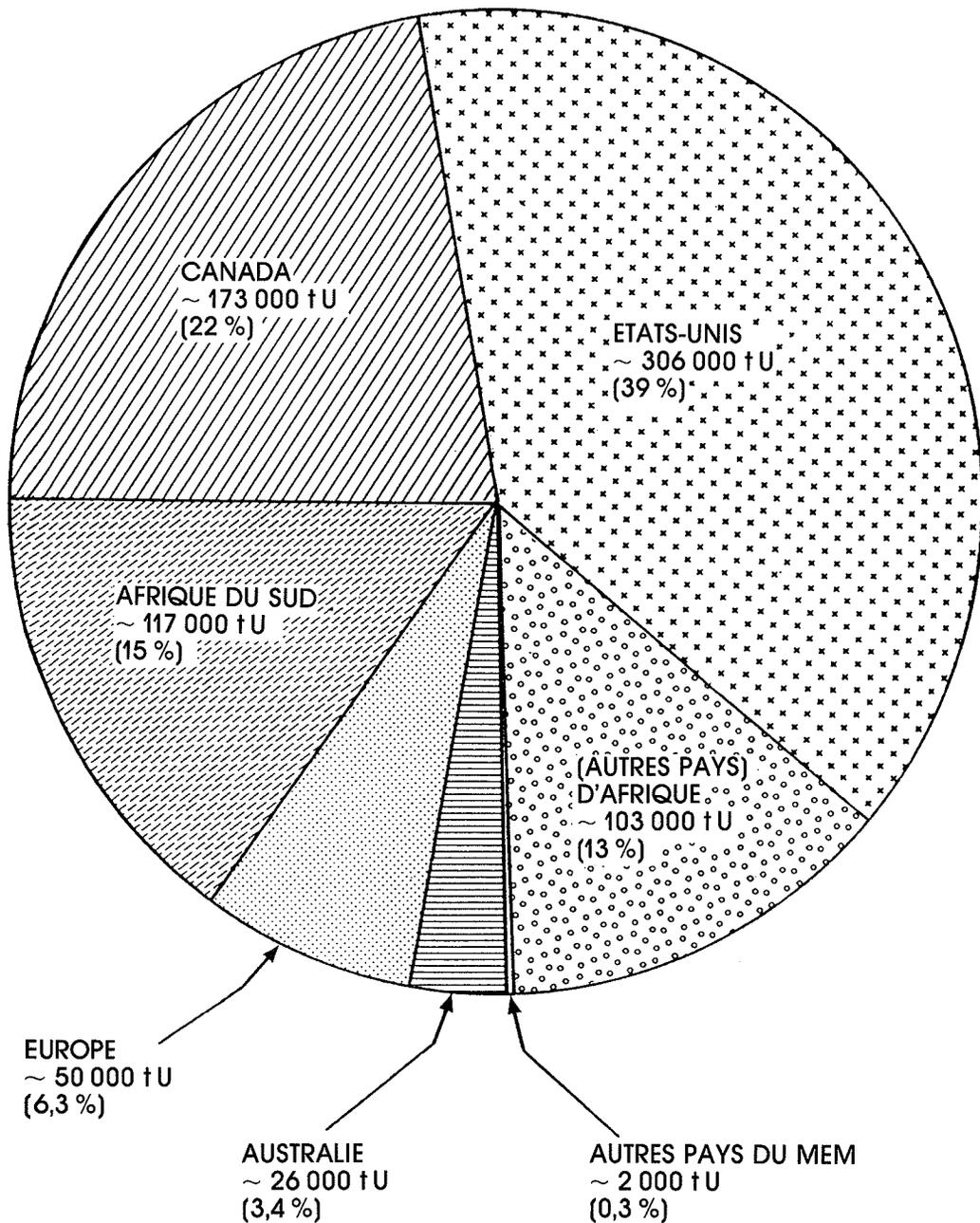


1. OCDE (AEN) / AIEA : Uranium : Ressources, production et demande, Paris, 1983, corrigé en fonction de la production et des estimations de production.

2. Ressources in situ.

Figure 2

Production cumulée d'uranium dans les pays du monde à économie de marché entre 1938 et 1984



$\Sigma \approx 777\ 000\ tU$

RSE-II). Les Ressources Spéculatives sont les quantités d'uranium contenues dans les gisements qui restent à découvrir, dont on présume l'existence dans d'autres régions géologiquement favorables.

Les ressources sont en outre subdivisées, sur la base du coût de production, en trois tranches de coûts : respectivement inférieures à \$ 80 par kg d'U, compris entre \$ 80 et \$ 130 par kg d'U et compris entre \$ 130 et \$ 260 par kg d'U. Les catégories de ressources les plus importantes sont les catégories RRA et RSE-I qui sont exploitables à des coûts allant jusqu'à \$ 130 par kg d'U parce qu'elles alimentent les centres de production d'uranium qui fournissent les approvisionnements en uranium de la zone MEM dans un avenir immédiat.

On estime actuellement que, pour l'ensemble des pays du MEM, ces catégories principales de ressources représentent 3,5 millions de tonnes d'U. Ainsi qu'il ressort des Figures 1a et 1b, la majorité des RRA et des RSE-I aujourd'hui recensées dans le MEM est concentrée dans un très petit nombre de pays : Australie, Etats-Unis, Afrique du sud, Canada, Niger, Brésil, Namibie, France. Il convient de souligner que ces tonnages ont été évalués par les pays eux-mêmes et que la méthodologie — et donc les degrés de certitude quant aux quantités indiquées dans les diverses catégories — varient d'un pays à l'autre. Toutefois, on estime que les valeurs annoncées donnent une bonne idée de la situation réelle.

Les probabilités de découvrir des ressources supplémentaires en uranium (c'est-à-dire, des Ressources Spéculatives) sont très bonnes, le tonnage de ces dernières étant évalué à environ 10 millions de tonnes. Toutefois, les activités de prospection menées dans les pays du MEM en vue de mettre en valeur ce potentiel ont sensiblement baissé ces dernières années, les dépenses consacrées à la prospection d'uranium ayant diminué de 80 pour cent depuis 1979, où quelque \$ 740 millions avaient été dépensés à ce titre. La chute a été particulièrement brutale aux Etats-Unis, où les dépenses ont diminué de près de 95 pour cent de 1979 à 1984. Quelques pays ont purement et simplement cessé leurs activités dans ce domaine, tandis que quelques autres ont maintenu un niveau d'activité relativement constant en vue de pourvoir à leurs besoins intérieurs à long terme.

Production d'uranium

La production cumulée d'uranium des pays du MEM à la fin de 1984 était évaluée à 780 000 tonnes d'U. Comme on peut le voir dans la Figure 2, plus de 75 pour cent de cette production a été assurée par les Etats-Unis, le Canada et l'Afrique du Sud. En 1983 et 1984, la production d'uranium a été d'environ 37 000 et 39 000 tonnes d'U respectivement, soit une production annuelle dépassant d'environ 4 000 tonnes les besoins des réacteurs. En 1985, la production a décliné d'environ 36 000 tonnes, niveau inférieur aux besoins des réacteurs d'environ 3 000 tonnes. C'est la première fois, depuis le début de l'ère commerciale, que la demande annuelle dépasse la production.

Un profond réaménagement est intervenu dans la production, dont le déclin global sensible s'est accompagné d'une diminution de la part des Etats-Unis au profit du Canada et de l'Australie. A l'heure actuelle, 98 pour cent de la production d'uranium du MEM est concentrée dans huit pays seulement.

Offre et demande d'uranium

La capacité théorique de production actuelle du MEM est évaluée à 44 000 tonnes par an. La capacité théorique cumulée de tous les centres de production existants et commandés pourrait être portée à plus de 49 000 tonnes par an d'ici le début des années 90, et devrait baisser légèrement par la suite. Si l'on compare les capacités théoriques de production d'uranium projetées à court terme avec les besoins prévus des réacteurs, il apparaît que les centres de production existants et commandés sont suffisants pour répondre aux besoins jusqu'à la fin de la présente décennie.

Il est beaucoup plus difficile d'analyser la situation de l'offre et de la demande à long terme (jusqu'en 2025). Des projections à si long terme sont assorties d'un grand nombre d'incertitudes, la plus importante étant le taux d'expansion escompté de la puissance nucléaire installée. En effet, d'ici l'an 2025, la fourchette de la puissance nucléaire dans le MEM varie d'un facteur de plus de 2 (675-1555 GWe)*. En ce qui concerne les besoins cumulés en uranium du MEM jusqu'en 2025, la fourchette va de 2,0 millions à 5,5 millions de tonnes d'U, selon la stratégie de réacteur choisie et les prévisions retenues au sujet du taux d'expansion de la puissance nucléaire installée.

Dans l'hypothèse d'une expansion rapide du parc électronucléaire, les capacités théoriques de production à partir des ressources connues devraient suffire pour répondre aux besoins jusqu'aux environs de l'an 2000, mais il faudra découvrir de nouveaux gisements pour alimenter la capacité théorique de production supplémentaire requise au-delà de cette date. L'ordre de grandeur de la capacité théorique de production supplémentaire nécessaire d'ici l'an 2025 est comprise entre moins d'une fois et demie et plus de trois fois la capacité maximale actuellement jugée possible à partir des ressources connues. Dans l'hypothèse d'une expansion lente de la puissance nucléaire installée, les capacités théoriques de production devraient être suffisantes bien au-delà de l'an 2000 et la capacité théorique de production supplémentaire requise ne serait pas très importante.

Prospection

Manifestement, il est improbable que la disponibilité des ressources en uranium constitue un obstacle au développement de l'énergie nucléaire jusqu'en 2025. L'importante quantité de ressources spéculatives dont on présume l'existence dans le MEM (environ 10 millions de tonnes d'U) permet de formuler cette conclusion avec un degré de confiance raisonnable. Toutefois, surtout dans le cas des scénarios tablant sur une forte croissance de la demande, il faudra mettre en valeur la plus grande partie du potentiel uranifère attribué aux catégories des RSE-II et des Ressources Spéculatives pour pourvoir alimenter la capacité théorique de production supplémentaire requise. Il paraît évident que le faible niveau actuel des activités de prospection sera insuffisant pour découvrir la quantité voulue de nouveaux gisements. Compte tenu des longs délais qui caractérisent les activités de prospection et de mise en valeur (une dizaine d'années), il faudrait de toute façon inverser rapidement la tendance à la baisse des activités de prospection. Des conditions de marché favorables et un effort de planification seront nécessaires pour assurer le maintien des activités de prospection à des niveaux appropriés.

*Voir le rapport AEN/AIEA "L'énergie nucléaire et son cycle du combustible", Paris (sous presse)

Les coûts du déclassement des grands réacteurs de puissance

J. Vira

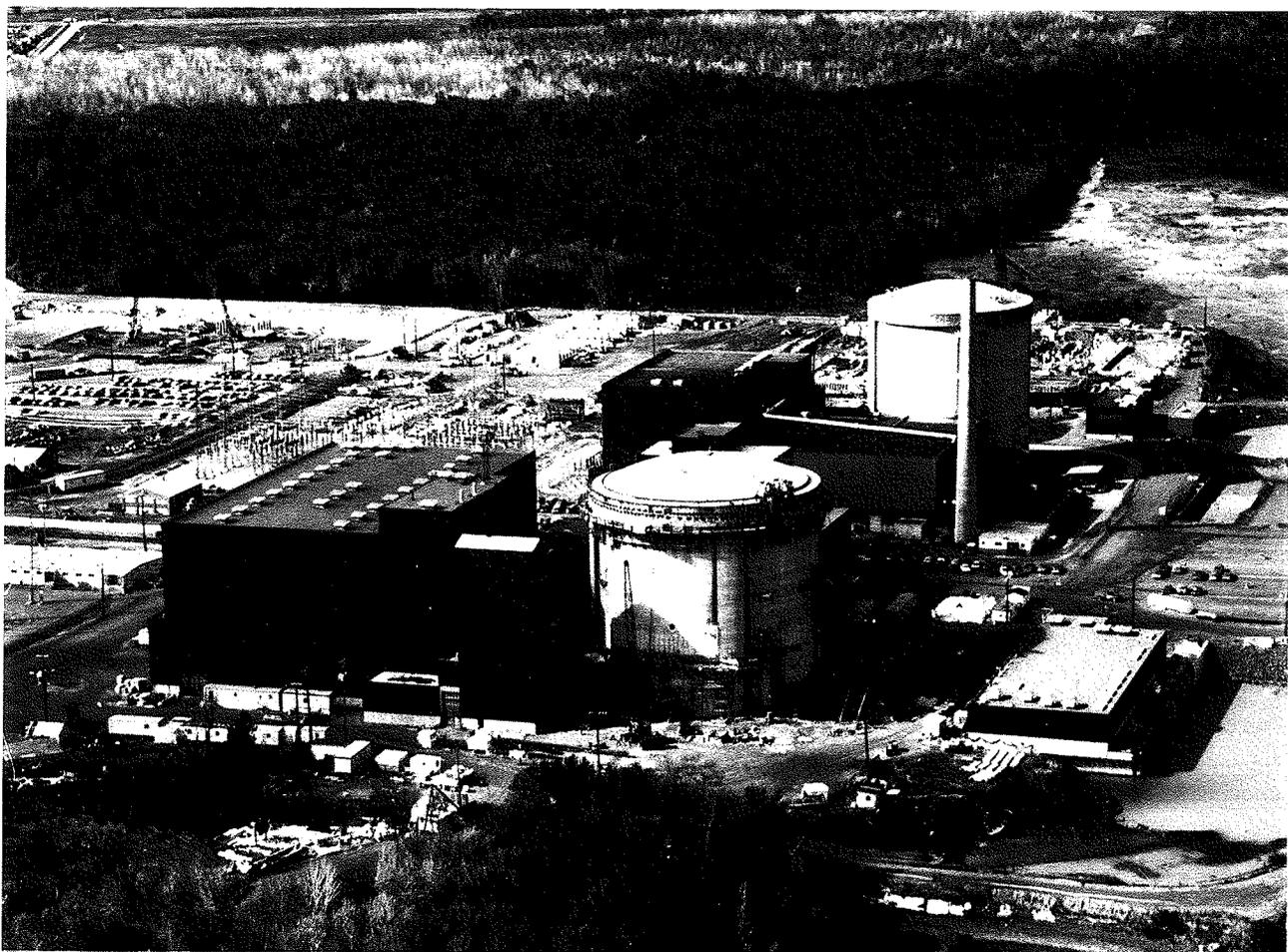
Presque tous les grands réacteurs de puissance actuellement en exploitation ont été construits après 1970 et dans les pays de l'OCDE, par exemple, plus des deux-tiers de la puissance nucléaire totale a été installée après 1975. Seul un nombre relativement modeste de grands réacteurs de puissance devront donc être déclassé avant l'an 2000. Quand viendra le moment de procéder au déclassement, il est probable que de nombreux propriétaires de centrales différeront les opérations finales de démantèlement de plusieurs décennies pour permettre aux radionucléides à courte période de se désintégrer.* Par conséquent les évaluations des coûts afférents aux opérations futures de déclassement sont encore souvent préliminaires et les estimations faites sur la base de travaux de déclassement en cours comportent d'importantes incertitudes. Néanmoins, des estimations prévisionnelles sont nécessaires pour planifier le financement, surtout si les coûts du déclassement doivent être repercutés dans les tarifs actuels de l'électricité.

Evaluation des coûts

L'AEN a entrepris une étude des estimations actuelles des coûts du déclassement dans cinq pays membres. Ces évaluations concernent trois filières de réacteur dont les puissances unitaires s'échelonnent de 440 MWe à 1 200 MWe ; trois de ces évaluations se rapportent à des centrales comprenant plusieurs tranches. Certains pays ont envisagé plusieurs stratégies de déclassement. En ce qui concerne le démantèlement immédiat des réacteurs à eau sous pression (REP), les coûts estimatifs sont compris entre \$65 millions pour une centrale comportant

J. Vira est consultant auprès de la Division du développement nucléaire de l'AEN.

*Voir "Stratégies de démantèlement des réacteurs de puissance de grande dimension", AEN Bulletin, Vol. 3, No. 2, Automne 1985.



Le réacteur Gentilly-1 au Canada sera bientôt prêt à être déclassé.
Photo EAEL

deux tranches de 440 MWe et \$96 millions pour une centrale de 1 200 MWe (dollars des Etats-Unis de janvier 1984). S'agissant des réacteurs à eau bouillante (BWR), les évaluations correspondantes se situent entre \$55 millions (centrale à une seule tranche de 440 MWe) et \$116 millions (pour une centrale comportant deux tranches de 710 MWe). On évalue à \$212 millions le coût estimatif du démantèlement immédiat d'une centrale à eau lourde (HWR) dotée de quatre tranches d'une puissance de 515 MWe chacune.

Il est probable que les différences dans les caractéristiques techniques des centrales influenceront davantage sur les coûts du déclassement que de petites différences dans la puissance installée. Toutefois, il est manifeste qu'on ne saurait comparer directement les estimations relatives aux tranches de 440 MWe à celles qui se rapportent à des tranches dépassant 1 000 MWe. On a procédé à des comparaisons simples en appliquant aux estimations des coefficients d'ajustement linéaire : on a porté ou ramené, selon le cas, chaque évaluation des coûts à l'échelle d'une centrale de 1 300 MWe en utilisant le rapport des puissances installées. Simultanément, toutes les évaluations ont été majorées de 25 pour cent pour parer à toute éventualité. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le Tableau 1. Outre le démantèlement immédiat, on trouvera les fourchettes de coûts

correspondant à deux autres stratégies de déclassement : démantèlement de niveau 3 précédé par un démantèlement de niveau 1 et une période de stockage de 30 ans ; et démantèlement de niveau 3 précédé par un démantèlement de niveau 2 et une période de stockage de 100 ans*. On trouvera dans le tableau les coûts totaux non actualisés. Dans le cas des réacteurs à eau ordinaire, on estime le plus souvent que, si l'on s'en tient aux coûts non actualisés, le démantèlement immédiat de niveau 3 revient moins cher que les autres stratégies. Toutefois, la comparaison des coûts actualisés au moment de la mise à l'arrêt d'un réacteur conduit à une autre conclusion : quel que soit le type de réacteur, les coûts actualisés sont moins élevés quand on opte pour des stratégies fondées sur un report plutôt que sur une exécution immédiate du niveau 3 (voir Tableau 2).

Incidence sur les coûts de production de l'électricité

S'ils sont échelonnés tout au long de la vie utile de la centrale électrique, les coûts du déclassement semblent modestes dans toutes les stratégies envisagées. On estime les coûts à moins d'un demi mill par kilowatt-heure, si on applique au coût moyen un taux d'actualisation de 5 pour cent et, même sans actualisation, le déclassement revient à environ 1 mill par kWh dans l'hypothèse la plus défavorable étudiée (dollars des Etats-Unis de janvier 1984 : 1 mill = 0,001 dollar). Le coût moyen par kilowatt-heure, s'il est facturé aux consommateurs d'électricité pendant la vie utile de la centrale, permettra de recueillir des fonds suffisants pour faire face à tous les coûts liés au déclassement, à condition d'appliquer aux sommes ainsi perçues le même taux d'intérêt réel que celui retenu pour l'actualisation.

Une comparaison avec l'ensemble des coûts afférents à la production d'électricité ramène les coûts du déclassement à leurs justes proportions.* En cas de taux d'actualisation très faibles, le déclassement pourrait représenter quelques centièmes de l'ensemble des coûts moyens de la production d'électricité. Si l'on suppose un taux d'actualisation supérieur à 5 pour cent, cette proportion serait inférieure à 1,5 pour cent.

Même si l'on tient compte des incertitudes liées aux évaluations des coûts, l'effet du déclassement sur les coûts de production restera faible et sera négligeable par rapport au coût total de l'énergie nucléaire. Les incertitudes liées aux évaluations des coûts diminueront à mesure que l'expérience s'accumulera. Cependant, comme il ressort clairement des Tableaux 1 et 2, les comparaisons économiques des diverses stratégies de déclassement sont fortement influencées par les taux d'actualisation retenus. Dans la planification financière du déclassement, il faut aussi prendre conscience des incertitudes afférentes aux taux d'intérêt.

TABLEAU 1

Fourchette des coûts estimatifs afférents à diverses stratégies de déclassement

(Centrales de 1 300 MWe, majoration de 25 % pour frais imprévus)

	Millions de dollars des E.U. de janvier 1984		
	REP	BWR	HWR
Niveau 3 Immédiatement	95 — 120	115 — 175	145
Niveau 1 / stockage de 30 ans / niveau 3	120	110 — 180	115
Niveau 2 / stockage de 100 ans / niveau 3	160	185	—

TABLEAU 2

Fourchette des coûts estimatifs actualisés afférents à diverses stratégies de déclassement

(Centrales de 1 300 MWe, majoration de 25 % pour frais imprévus, taux d'actualisation : 5 %)

	Millions de dollars des E.U. de janvier 1984		
	REP	BWR	HWR
Niveau 3 Immédiatement	85 — 105	100 — 155	130
Niveau 1 / stockage de 30 ans / niveau 3	30 — 40	25 — 50	30
Niveau 2 / stockage de 100 ans / niveau 3	55	70	—

* Voir "Projections relatives aux coûts de production de l'électricité dans les centrales nucléaires et les centrales au charbon mises en service en 1995", AEN/OCDE (1986)

Les coûts de production de l'électricité

M. J. Crijns

Les importantes fluctuations des taux de change et la modification des prévisions des prix futurs du charbon intervenues depuis le début des années 80 ont incité l'AEN à mettre à jour son rapport de 1983 sur *Les coûts de production de l'électricité dans les centrales nucléaires et les centrales au charbon*. L'AEN a fondé cette mise à jour sur des données relatives aux coûts de production de l'électricité dans les pays Membres de l'OCDE par des centrales nucléaires et au charbon présumées entrer en service au milieu des années 90.

On a adopté la méthode du coût moyen actualisé en monnaie constante*, car elle était considérée comme le seul moyen fiable de comparer différents coûts de production. En outre, on a établi une série d'hypothèses communes afin de rendre significative une comparaison internationale. Dans l'hypothèse de référence, les centrales nucléaires étaient présumées avoir une durée de vie rentable de 25 ans. On a admis qu'elles seraient exploitées selon le mode en base et entreraient en exploitation de façon progressive. Le facteur de charge moyen pendant la durée de vie utile a toutefois été maintenu à 72 pour cent environ. Les coûts de production ont été calculés à l'aide d'un taux d'actualisation réel de 5 pour cent et on a choisi le dollar des Etats-Unis au 1er janvier 1984 comme unité monétaire. Les coûts de construction, d'exploitation et d'entretien des centrales, leur calendrier de construction et le choix des prix du combustible ont été indiqués par chaque pays participant.

Cette mise à jour confirme les conclusions du rapport de 1983 : les coûts projetés de production d'électricité à partir des centrales nucléaires demeurent sensiblement inférieurs à ceux des centrales au charbon en Europe, au Japon et dans certaines zones de l'Amérique du nord. Seules des parties des Etats-Unis et du Canada où il est possible d'extraire du charbon bon marché connaissent une situation inverse.

Les centrales nucléaires qui entreront en service en 1995 en Europe et au Japon présenteront un avantage de 20 à 80 pour cent par rapport aux centrales concurrentes alimentées au charbon. Dans certains cas, notamment aux Etats-Unis et au Canada, la compétitivité du nucléaire et du charbon dépendra de la région considérée. Les centrales nucléaires présenteront dans la zone centrale et orientale du Canada un avantage économique de 20 à 45 pour cent et conserveront une faible supériorité de 8 pour cent dans la partie est des Etats-Unis.

Les coûts de production de l'électricité dans les centrales au charbon sont très sensibles au prix du charbon à

la livraison, au choix du site d'implantation de la centrale et aux coûts de transport. Ils sont également déterminés par le niveau des mesures de lutte contre la pollution atmosphérique qui sont appliquées. Ainsi, une centrale au charbon située à proximité des grands gisements de houille de l'Amérique du Nord serait moins coûteuse à construire et à exploiter qu'une centrale nucléaire, même si la première était équipée de systèmes de désulfuration des gaz de combustion. Aux Etats-Unis, toutefois, un raccourcissement des délais de construction et d'autres améliorations apportées aux programmes de construction des centrales nucléaires, tels que ceux déjà réalisés dans quelques centrales américaines, renforceraient notablement la position concurrentielle du nucléaire.

Les coûts d'investissement diffèrent largement selon les pays par suite de différences dans la conception, l'échelle, les conditions d'implantation, les avantages découlant de la construction de plusieurs tranches d'un même type, ainsi que de l'expérience acquise en matière de construction. De même, les coûts de la main-d'oeuvre, les dépenses imprévues et les périodes de construction diffèrent parmi les pays et influent sur le montant total des coûts d'investissement. Les frais d'exploitation et d'entretien afférents aux deux types de centrales diffèrent également selon les pays, pour des raisons du même ordre que pour les coûts d'investissement. Les calendriers de rechargement en combustible constituent un important facteur pour les centrales nucléaires et il en va de même des systèmes de protection de l'environnement dans le cas des centrales au charbon.

Les coûts du combustible nucléaire dépendent des politiques nationales et des prévisions de coûts du combustible nucléaire. Certains pays choisissent de recourir au cycle à passage unique, alors que d'autres projettent de retraiter le combustible. Les prix afférents aux services liés au cycle du combustible ne devraient pas augmenter en termes réels au cours de la durée de vie prévue des réacteurs. Certains pays escomptent une augmentation réelle atteignant 2 pour cent par an uniquement dans le cas de l'uranium.

Les coûts du combustible pour les centrales au charbon dépendent des prévisions visant les prix du charbon. Ils sont fonction de la manière dont le charbon est extrait et de la localisation des mines. Les coûts d'extraction dans la République fédérale d'Allemagne et au Royaume-Uni sont élevés, alors qu'ils sont faibles aux Etats-Unis et au Canada. Les coûts du transport du charbon dépendent de l'endroit où se trouvent la mine et la centrale et de la distance qui les sépare. Cinquante pour cent des pays escomptent une augmentation réelle des prix comprise entre 1 et 3 pour cent par an.

Le tableau récapitule les coûts moyens actualisés de production de l'électricité pour l'hypothèse de référence, exprimés en mills par kWh de 1984. Les coûts de production dans les centrales tant nucléaires qu'au

M.J. Crijns fait partie de la Division du développement nucléaire de l'AEN.

* Voir "Les aspects économiques du cycle du combustible nucléaire", M. J. Crijns, AEN Bulletin 4(85), pp. 4 à 10.

charbon varie d'un facteur 2 environ, par suite d'une combinaison de facteurs spécifiques à chaque pays. Dans le cas du nucléaire, ils sont liés pour une large part aux variations des coûts d'investissement et dans le cas du charbon, aux variations des coûts du combustible.

En plus de l'hypothèse de référence, on a procédé à des calculs de sensibilité portant sur les paramètres les plus importants. Selon les paramètres choisis, la situation se modifiera mais, d'une façon générale, le nucléaire conserve son avantage.

Récapitulation des coûts moyens actualisés de production de l'électricité pour l'hypothèse de référence									
Taux d'actualisation : 5 %					En mills/kWh de janvier 1984				
CENTRALES NUCLEAIRES					CENTRALES AU CHARBON				
Pays	Investissement	Exploitation et entretien	Combustible	Total	Investissement a)	Exploitation et entretien a)	Combustible	Total	Rapport Charbon Nucléaire
Allemagne République fédérale d'	15,6	5,0	7,3	27,9	7,6	5,8	33,4	46,8	1,68
	15,6	5,0	6,5 g)	27,1	7,6	5,8	41,3 j)	54,7	2,02
	15,6	5,0	6,5 g)	27,1	7,6	5,8	24,9 i)	38,3	1,41
Belgique	11,5	3,5	7,3	22,3	8,1	5,1	22,9	36,1	1,62
Canada Zone centrale Est-n/Est-ch b)	14,2	2,5	3,6	20,3	9,5	2,8	16,9	29,2	1,44
	22,1	7,7	3,1	32,9	7,6	4,7	26,5	38,7	1,18
	22,1	7,7	3,1	32,9	11,3	3,9	6,7	22,8	0,66
Canada Est-n/Ouest-ch c)	22,1	7,7	3,1	32,9	11,3	3,9	6,7	22,8	0,66
	22,1	7,7	3,1	32,9	11,3	3,9	6,7	22,8	0,66
Espagne	16,3	5,1	7,6	29,0	6,7 j)	3,7 j)	24,0	34,4	1,19
Etats-Unis Zone centrale Zone centrale d) Zone orientale Montagnes rocheuses	31,8	4,9	7,1	43,8	14,0	4,8	17,4	36,2	0,83
	20,6	4,9	7,1	32,6	14,0	4,8	17,4	36,2	1,11
	32,0	4,5	7,1	43,6	14,2	4,0	28,8	47,0	1,08
	31,0	4,6	7,1	42,7	13,8	4,7	15,3	32,9	0,77
Finlande	14,3	3,6	7,2	25,1	8,1	4,3	21,0	33,4	1,33
France	9,5	4,0	7,3	20,8	7,1 j)	3,2 j)	27,1	37,4	1,80
Italie	12,4	3,5	8,4	24,3	6,8 j)	2,8 j)	24,6	34,4	1,41
Japon	15,4	6,1	10,1	31,6	11,6	5,8	25,9	43,3	1,37
Norvège	14,6	4,5	7,3	26,4	8,3	5,9	17,5 i)	31,7	1,20
	14,6	4,5	7,3	26,4	8,3	5,9	22,2 h)	36,4	1,38
Pays-Bas	14,0	3,5	7,4	24,9	7,5	3,3	21,9	32,7	1,31
Portugal	—	—	—	—	9,1 j)	2,1 j)	29,3	40,5	—
	—	—	—	—	10,9	10,6	29,9	51,3	—
Royaume-Uni e) f)	22,8	5,5	8,8	37,0	12,4 j)	4,5 j)	34,8	51,7	1,40
	16,1	5,5	8,8	30,3	12,4 j)	4,5 j)	34,8	51,7	1,71
Suède	—	1,6	6,5	—	9,2	3,1	21,9	34,2	—
Suisse	22,8	4,2	8,4	35,5	—	—	—	—	—
Turquie CANDU PWR	21,6	5,9	3,1	30,6	—	—	—	—	—
	17,3	4,9	5,5	27,7	—	—	—	—	—

- a. Y compris la désulfuration, sauf indication contraire.
- b. Centrale nucléaire dans la zone orientale et centrale au charbon dans la zone orientale.
- c. Centrale nucléaire dans la zone orientale et centrale au charbon dans la zone occidentale.
- d. Meilleures performances obtenues (construction accélérée).

- e. Tranche B de la centrale de Sizewell.
- f. Deuxième tranche du même type.
- g. Coût de combustible bon marché.
- h. Charbon à prix élevé.
- i. Charbon bon marché.
- j. Sans désulfuration.

L'AEN examine les répercussions de l'accident de Tchernobyl

A la suite de l'accident du réacteur de Tchernobyl survenu en Union soviétique le 26 avril 1986, l'AEN a réuni son comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN), ainsi que des experts en protection radiologique, en vue d'examiner les répercussions de l'accident dans les pays de l'OCDE. On trouvera ci-après un résumé des discussions.

Le Comité a noté que le réacteur qui a subi l'accident en URSS diffère substantiellement des réacteurs qui peuvent être autorisés dans les pays de l'OCDE et qui répondent aux normes de sûreté existantes. Le Comité estime qu'il faut étudier en permanence les conséquences de l'accident mais, d'après les informations disponibles, aucune mesure n'est nécessaire dans l'immédiat concernant une révision des approches de sûreté pour la construction ou l'exploitation des centrales nucléaires dans les pays de l'OCDE.

Les phénomènes qui pourraient conduire à des accidents entraînant une détérioration du cœur dans les réacteurs à eau ordinaire ont été étudiés depuis longtemps dans les pays de l'OCDE. Ces études ont été renforcées à la suite de l'accident de Three Mile Island survenu il y a sept ans, et elles ont permis, notamment, de mieux juger de la capacité des enceintes de confinement et des autres barrières du réacteur de limiter les conséquences de tels accidents, et d'avoir de meilleures indications pour faire face à des événements de ce type. Les pays de l'OCDE sont prêts à partager activement les informations dont ils disposent en ce qui concerne les accidents de réacteur sévères.

Le Comité a souligné qu'une coopération étroite existe depuis longtemps entre les pays de l'OCDE sur toutes les questions ayant trait aux techniques de sûreté et pour l'analyse de l'expérience d'exploitation des centrales. Le Comité a insisté sur le fait qu'une telle coopération est nécessaire à une époque où le nucléaire est devenu une réalité et qu'elle devrait servir d'exemple. Le

Comité s'est félicité, à cet égard, de la déclaration faite au récent sommet de Tokyo sur l'importance de la coopération internationale dans le domaine de la sûreté nucléaire.

Le Comité a également entendu des rapports de différents pays de l'OCDE concernant les mesures radiologiques qu'ils ont effectuées à la suite de l'accident. Sur la base des données radiologiques disponibles et des résultats de mesure enregistrés dans ces pays, et notamment une déclaration de l'Organisation mondiale de la santé, le Comité a conclu que, jusqu'ici, l'accident n'a causé aucun risque important pour la santé publique dans les pays de l'OCDE, comparé à d'autres risques sanitaires. Cependant, il est prévu de procéder à des investigations plus approfondies et plus étendues, en pleine coopération avec les autres organisations internationales intéressées, lorsque l'on disposera de données plus nombreuses à des fins d'analyse.

Les comités spécialisés compétents de l'Agence pour l'énergie nucléaire — Comité sur la sûreté des installations nucléaires et Comité de protection radiologique et de santé publique — vont procéder à un examen plus approfondi de cet événement en vue de déterminer si d'autres dispositions devraient être prises. Par exemple, certains pays ont suggéré qu'un système d'information rapide et de communication de données soit établi entre les pays de l'OCDE afin de disposer de meilleures bases pour prendre promptement les dispositions voulues en cas d'accident nucléaire, dans la mesure où un système mondial ne pourrait être établi à bref délai.

La situation de l'énergie nucléaire dans les pays de l'OCDE au 31 décembre 1985

En 1985, la demande d'électricité a continué à croître dans les pays de l'OCDE de 3,1 pour cent, et la part de la production d'électricité d'origine nucléaire a atteint 21 pour cent. La demande d'électricité a progressé au même rythme que le PIB et, malgré le ralentissement dans les commandes de nouvelles centrales et la croissance modeste de la consommation d'énergie primaire, la part de l'électricité d'origine nucléaire devrait continuer à augmenter. Dans l'ensemble, les perspectives de l'électronucléaire sont jugées encourageantes.

Pays	Capacité nucléaire (centrales exploitables) (GWe)	Production d'électricité nucléaire (TWh)	Part du nucléaire dans la production totale d'électricité (%)
Allemagne R.F.	16,2	119,6	31,2
Belgique	5,4	32,4	59,8
Canada	9,6	57,1	12,8
Espagne	5,7	26,7	21,5
Etats-Unis	80,1	384,0	15,6
Finlande	2,3	18,0	38,2
France	39,0	213,1	64,8
Italie	1,3	6,8	3,9
Japon	24,7	157,0	26,1
Pays-Bas	0,5	3,2	5,3
Royaume-Uni	7,1	52,0	19,5
Suède	9,5	55,9	42,2
Suisse	2,9	21,3	39,8
Total OCDE	206,7 *	1 147,1	20,7

* Ce total comprend une capacité supplémentaire de 2,4 GWe au Royaume-Uni, reliée au réseau mais non encore totalement en service.

Nouvelles publications de l'AEN

Les questions d'interface dans la sécurité nucléaire

Compte rendu d'un colloque de l'AEN, Paris, 1985

ISBN 92-64-02726-2

Prix : 20.00 US\$40.00 FF200.00

Etant donné le caractère très complexe de certaines notions de sûreté utilisées dans l'industrie nucléaire, leur application peut soulever des difficultés. Afin de les surmonter, il faut une bonne connaissance de la nature des interfaces existant entre les différentes disciplines qui interviennent dans la sécurité nucléaire. On trouvera dans ce rapport le compte rendu du colloque international organisé à l'initiative de l'Agence en vue de rechercher des solutions satisfaisantes aux problèmes d'interface.

Surveillance en continu de l'intégrité du circuit de refroidissement des réacteurs

Compte rendu d'une réunion de spécialistes du CSIN, Paris, 1986

ISBN 92-64-02794-7

Prix : 20.00 US\$40.00 FF200.00

La surveillance en continu contribue de façon notable à assurer l'intégrité d'un circuit de refroidissement de réacteur. Elle peut donner un avertissement préalable de la dégradation des structures et indiquer sur quel point il convient d'axer l'inspection à l'arrêt. Le présent compte rendu décrit l'état d'avancement de plusieurs techniques susceptibles d'être utilisées à cet effet. Celles-ci permettent notamment de mesurer les vibrations dans les structures, le bruit neutronique dans le cœur, l'émission acoustique provenant des fissures, les fuites de réfrigérant ou des paramètres d'exploitation tels que la température et la pression du réfrigérant.

Termes sources en cas d'accident de réacteur nucléaire

ISBN 92-64-12808-5

Prix : 6.00 US\$12.00 FF120.00

Le "terme source" désigne la quantité, la distribution dans le temps et les caractéristiques de la radioactivité

qui s'échapperait du site d'une centrale nucléaire au cours d'un accident grave. Cette question importante suscite un regain d'intérêt dans la mesure où l'on a observé que le rejet de matières radioactives provoqué par l'accident survenu dans la centrale de Three Mile Island, en 1979, a été moins important qu'on ne pouvait le supposer. Ce rapport résume les conclusions d'un groupe international d'experts qui a comparé et analysé toutes les informations dont on dispose actuellement sur les termes sources.

Accidents sévères dans les centrales nucléaires

ISBN 92-64-12821-7

Prix : 3.50 US\$7.00 FF35.00

L'expression "accident sévère" désigne un accident qui, dans un réacteur nucléaire, pourrait dépasser les spécifications de conception au point que le refroidissement du cœur du réacteur ne serait plus possible par des moyens normaux. Ce rapport résume le travail d'un groupe d'experts de haut niveau de l'AEN qui ont étudié la réponse potentielle des réacteurs à eau ordinaire actuels aux accidents sévères. Les experts ont conclu que les modèles existants de réacteurs sont beaucoup plus capables de résister à des accidents sévères que les spécifications de conception ne le laissent supposer.

Evaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs

Compte rendu d'une réunion de travail de l'AEN, Paris, 1985

ISBN 92-64-02831-5

Prix : 12.00 US\$24.00 FF120.00

Le terme d'évaluation des performances des systèmes est utilisé pour décrire toutes les séquences analytiques liées à l'évaluation des incidences radiologiques d'un système d'évacuation des déchets radioactifs. Le présent compte rendu comprend les communications présentées et les résultats obtenus au cours de la réunion de travail que l'AEN a consacrée à l'évaluation des performances des systèmes d'évacuation des déchets radioactifs et, notamment, à l'étude des relations entre les éléments les plus importants de ce sujet complexe.