

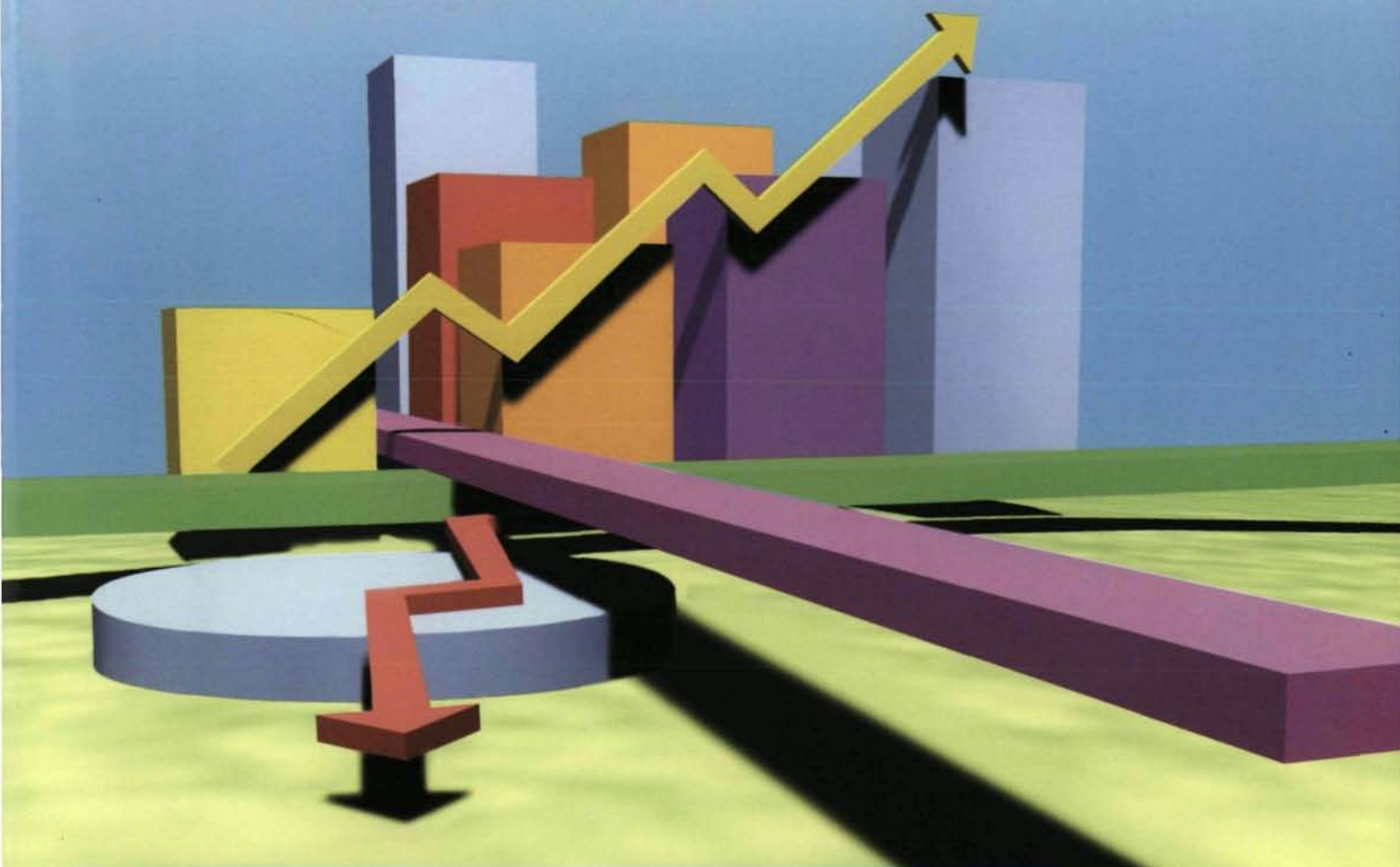
VOL. 42, Nr. 2, 2000
VIENNE, AUTRICHE

AIEA

BULLETIN



REVUE TRIMESTRIELLE DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE



SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT

DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE DURABLE

DESARROLLO ENERGETICO SOSTENIBLE

УСТОЙЧИВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ

تنمية الطاقة المستدامة

能源的可持续发展

MERCI DE VOTRE AIDE

Nous remercions toutes les personnes qui ont répondu à l'enquête approfondie que nous avons effectuée l'an dernier auprès des lecteurs du Bulletin de l'AIEA. Cette enquête nous sera utile pour actualiser notre liste de diffusion et définir nos futures orientations éditoriales. Nous avons reçu un excellent écho de milliers de destinataires du monde entier et traitons maintenant vos réponses. Dans les mois à venir, nous vous rendrons compte des résultats de l'enquête. Nous vous sommes reconnaissants d'avoir pris le temps de répondre au questionnaire et tiendrons compte de votre avis quant à la façon dont nous pourrions mieux encore vous servir à l'avenir.

— La rédacteur en chef





SOMMAIRE

L'ÉNERGIE DE DEMAIN

Le Conseil mondial de l'énergie pour une action d'ampleur mondiale
Gerald Doucet

2

DÉVELOPPER L'INFRASTRUCTURE ÉNERGÉTIQUE

Développement des moyens d'évaluation comparative de la situation énergétique
Bruce Hamilton, Guenter Conzelmann et Duy Thanh Bui

8

DES OUTILS DE SUIVI DU PROGRÈS

Les indicateurs d'un développement énergétique durable
Arshad Khan, Hans-Holger Rogner et Garegin Aslanian

14

ÉVALUER LA DIFFÉRENCE

Émissions de gaz à effet de serre provenant des chaînes de production d'électricité
Joseph V. Spadaro, Lucille Langlois et Bruce Hamilton

19

REPENSER LES CHOIX

Les mécanismes flexibles de Kyoto et l'énergie nucléaire
Hans-Holger Rogner

25

LES FORCES AGISSANTES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'énergie nucléaire et les derniers scénarios d'émissions du GIEC
Vladimir Kagramanian, Serguei Kononov et Hans-Holger Rogner

31

DES OBJECTIFS ÉVOLUTIFS

Compétitivité économique de l'énergie nucléaire
Hans-Holger Rogner et Lucille Langlois

36

DE LA NÉCESSITÉ DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Un point de vue sur l'exaltant avenir énergétique de la planète
Richard Rhodes et Denis Beller

43

DE NÉCESSAIRES INNOVATIONS

Amélioration des réacteurs nucléaires et du cycle du combustible
D. Majumdar, J. Kupitz, H. Rogner, T. Shea, F. Niehaus et K. Fukuda

51

RUBRIQUES DU BULLETIN DE L'AIEA

Actualités internationales...Données statistiques...Vacances de postes...Publications...Réunions...PRC/Séminaires

60

L'ÉNERGIE DE DEMAIN

LE CONSEIL MONDIAL DE L'ÉNERGIE POUR UNE ACTION D'AMPLEUR MONDIALE

GERALD DOUCET

*Depuis que le Conseil mondial de l'énergie (CME) a publié, en 1993, son rapport intitulé *Energy for Tomorrow's World – The Realities, the Real Options and the Agenda for Achievement*, bien des évolutions se sont produites dans le secteur mondial de l'énergie.*

En avril 2000, le CME a publié une Déclaration dans laquelle il réexaminait la situation de l'énergie dans le monde, révisant à cette occasion son rapport de 1993. La Déclaration publiée en 2000 par le CME examinait de façon critique les scénarios antérieurs et proposait un nouvel ensemble d'objectifs et d'actions. Elle avait pour objet de tirer parti de l'expérience acquise en huit ans sur le plan de l'analyse et d'élaborer un ensemble plus précis de mesures. Le CME, par sa Déclaration, a voulu contribuer à la lutte contre la pénurie d'énergie partout où elle se produit; améliorer la qualité et la fiabilité de l'énergie fournie; et atténuer les effets négatifs du développement énergétique sur l'environnement et la santé.

La Déclaration 2000 du CME définit les objectifs et les mesures énergétiques qui, adoptés maintenant, permettraient d'envisager avec un optimisme raisonnable les tâches à venir. Le présent article s'inspire du résumé de la Déclaration et en fait ressortir les principaux points dans le contexte des principaux événements survenus ces huit dernières années.

Ces huit dernières années, certains des moteurs de la croissance économique et de la consommation d'énergie ont changé.

M. Doucet est secrétaire général du Conseil mondial de l'énergie, organisation mondiale basée à Londres et opérant dans plus de 100 pays.

■ L'accroissement de la population mondiale s'est ralenti, mais l'urbanisation, en particulier dans les pays en développement, s'est accélérée. Pour 2020, la projection à moyen terme des Nations Unies est désormais de 7,4 milliards d'habitants, contre une prévision de 8,1 milliards au début des années 90.

■ La croissance économique a été plus faible au cours des huit dernières années que ne le supposait le rapport de 1993. Les problèmes continuels des économies en transition et les crises subséquentes survenues dans certaines parties de l'Asie et de l'Amérique latine, qui n'auraient pas pu être prédits en 1993, ont eu un impact négatif sur la consommation d'énergie.

L'intensité énergétique n'a pas chuté aussi rapidement que le prévoyait le rapport de 1993.

■ La coopération financière entre pays développés et pays en développement ne s'est pas améliorée depuis 1993. La solution, pour de nombreux pays, consiste toujours à entreprendre les réformes juridiques, financières et économiques qui attireront les capitaux nationaux et étrangers nécessaires à l'exécution de nouveaux projets énergétiques.

■ L'un des changements les plus fondamentaux a été l'ampleur de la déréglementation et de la restructuration des marchés énergétiques, associée à une forte tendance à l'intégration régionale et au commerce de l'énergie.

■ Un autre aspect essentiel a trait à l'action internationale menée en faveur de l'environnement. Cette action, qui a principalement été influencée à partir de 1992 par la Convention-cadre des Nations Unies sur le

changement climatique suivie de réunions de la Conférence des Parties, est également liée à la neuvième Conférence des Nations Unies sur le développement durable, qui aura lieu en 2001. La pollution locale et régionale ainsi que les émissions de gaz à effet de serre font l'objet d'une attention soutenue des milieux politiques, et la contribution des progrès énergétiques à la résolution de ces problèmes ainsi qu'à l'amélioration de la santé et du bien-être en général fait l'objet d'une surveillance étroite.

En 1993, on recensait dans le monde près de 1,8 milliard d'individus n'ayant pas accès à l'énergie industrielle. Malgré les efforts déployés ces huit dernières années pour raccorder environ 300 millions d'individus à des réseaux de distribution d'électricité ou pour les approvisionner en biocombustibles modernes et en autres sources d'énergie industrielle, on estime que la situation demeure inchangée pour 1,6 milliard d'individus, qui seront rejoints par quatre à cinq cents millions des 1,4 milliard d'individus à naître d'ici à 2020. La plupart de ces individus vivent dans des zones rurales et dans des bidonvilles de pays en développement. Les effets bénéfiques de la croissance économique et la mise en place d'une infrastructure énergétique permettant d'assurer la charge de base ne sont pas nécessairement la réponse à leurs problèmes de pénurie énergétique.

TROIS OBJECTIFS ÉNERGÉTIQUES

Le CME considère que la croissance économique et les

réformes institutionnelles nationales et internationales sont une condition essentielle pour que tous, y compris les deux milliards d'individus les plus pauvres de la planète, puissent accéder à l'énergie. Lorsque seuls certains individus ou certaines régions du monde profitent du développement énergétique et lorsque d'autres sont laissés pour compte, l'instabilité politique et sociale qui en résulte peut menacer gravement la paix mondiale et, partant, l'offre d'énergie du fait d'interruptions de l'approvisionnement. L'accessibilité à l'énergie, outre son impact sur l'offre d'énergie, est aussi étroitement liée à l'acceptabilité de cette dernière. Les partenariats d'investissement visant à garantir l'accessibilité et l'acceptabilité de l'énergie pourraient également tenter de résoudre des problèmes sociaux et environnementaux.

■ L'accessibilité est la fourniture – moyennant un paiement – de services énergétiques modernes, fiables et économiques. Elle est le résultat de politiques visant spécifiquement à répondre aux besoins des pauvres dans le contexte d'une présence accrue de signaux provenant du marché. La meilleure façon de faire en sorte qu'un nombre croissant d'individus bénéficie d'une énergie industrielle conforme à ses besoins est d'accélérer la croissance économique et de favoriser une répartition plus équitable des revenus. Il faut pour cela se fier davantage aux mécanismes du marché, tout en palliant ses faiblesses par des politiques *ad hoc*.

Une tarification de l'énergie reflétant tous les coûts, y compris les coûts externes tels que les émissions et la gestion des déchets, serait nécessaire pour pouvoir opérer des investissements suffisants et encourager les économies d'énergie et l'adoption

de techniques respectueuses de l'environnement, mais une telle tarification serait inabordable pour un grand nombre d'usagers. Dans le même temps, des tarifs subventionnés destinés à pratiquer des prix socialement abordables n'attireraient pas suffisamment d'investissements, ce qui, à terme, irait contre les intérêts des personnes ayant besoin d'une infrastructure énergétique industrielle. Il peut être nécessaire, parfois, de subventionner la production et la fourniture d'énergie pendant un certain temps sans créer de distorsions de prix ou, du moins, en limitant celles-ci au minimum.

■ L'offre recouvre à la fois la qualité et la fiabilité de l'énergie fournie. La continuité de l'offre d'énergie, en particulier d'électricité, est indispensable au XXI^e siècle. Il est possible, dans certaines circonstances et lorsque les conditions sont connues et comprises des usagers, de proposer à court terme une fourniture discontinue, mais des coupures de courant imprévues ont un coût social élevé qu'on ne peut ignorer. En raison du recours croissant, de par le monde, à l'informatique, cette fiabilité est encore plus indispensable qu'il y a huit ans. L'offre d'énergie exige à la fois un portefeuille énergétique diversifié adapté aux conditions particulières du pays et les moyens d'exploiter de nouvelles sources d'énergie potentielles. Selon la plupart des Comités membres du CME, toutes les ressources énergétiques seront nécessaires au cours des cinquante prochaines années, et l'on ne saurait exclure arbitrairement quelque sources d'énergie que ce soit.

■ L'acceptabilité a trait aux objectifs environnementaux et aux attitudes du public. La pollution locale est une source de nuisance pour des milliards d'individus, en particulier dans les pays en développement. Le changement

climatique mondial est devenu un important motif de préoccupation. Conscients de ces deux faits, les pays en développement s'inquiètent à la fois des niveaux croissants d'émissions domestiques produites par les consommateurs, qui entraînent une pollution locale (urbaine) et régionale (effet, par exemple, des pluies acides sur les récoltes et les forêts), et des répercussions que peuvent avoir sur l'économie les mesures prises pour faire face au changement climatique.

Le secteur énergétique est l'un des domaines dans lesquels des techniques nouvelles et facilement disponibles ont déjà réduit les émissions et permettent d'envisager de futures améliorations. Il faudra, bien entendu, mettre au point, diffuser, maintenir et développer dans le monde entier des techniques respectueuses de l'environnement. C'est pourquoi il faut encourager, au niveau local, la mise en place de moyens permettant à la population d'utiliser et de maintenir ces techniques. Les ressources énergétiques doivent être produites et exploitées de façon à protéger et à préserver, aujourd'hui et à l'avenir, l'environnement local et mondial.

La réalisation de ces trois objectifs que sont l'accessibilité, l'offre et l'acceptabilité est une condition *sine qua non* de la stabilité politique mondiale, du développement du commerce de l'énergie au XXI^e siècle et d'un avenir viable pour la population mondiale.

DIX MESURES DE POLITIQUE GÉNÉRALE

L'énergie est un élément important de tout solide programme de développement associant une politique macro-économique et des politiques non énergétiques. Il importe de mettre

Le Conseil mondial de l'énergie est la principale organisation mondiale spécialisée dans les questions d'énergie, toutes sources confondues. Il se compose de Comités membres qui se réunissent dans une centaine de pays. Le CME analyse et produit des rapports sur les problèmes mondiaux, régionaux et locaux ayant trait à l'énergie, souvent en collaboration avec des partenaires internationaux. Les activités du CME s'articulent autour de cycles de travail de trois ans culminant chacun par un Congrès mondial de l'énergie ouvert à ses membres, aux industriels de l'énergie, aux responsables gouvernementaux, aux organisations internationales, aux universitaires, aux médias et aux autres parties intéressées. Le prochain Congrès devrait avoir lieu en 2001 à Buenos Aires (Argentine). Pour tout renseignement concernant les programmes et les activités du CME, y compris la Déclaration 2000 sur la situation mondiale de l'énergie et les publications et rapports y afférents, on peut consulter le site Internet de l'organisation à l'adresse www.worldenergy.org. Le Secrétariat du CME est établi à Londres, 1-4 Warwick Street, 5th Floor, Regency House, W1R 6LE (Royaume-Uni).

en œuvre une politique financière, budgétaire et sociale équitable. Une faible inflation, des budgets équilibrés, des politiques de transferts sociaux incluant des prestations d'assurance maladie et de retraite, des programmes d'éducation et autres sont autant d'éléments indispensables à la création d'un tissu économique et social favorisant la croissance économique. Lorsque les marchés nationaux sont trop limités, il faut mettre en œuvre des politiques régionales offrant de vastes possibilités d'investissements intérieurs et étrangers directs et de développement des échanges.

Le CME est conscient qu'il existe une nécessité impérieuse de créer les conditions d'un développement global et d'une atténuation de la pauvreté. Pour préciser davantage le domaine de compétence du CME, nous avons choisi de nous concentrer sur dix mesures prioritaires intéressant le secteur énergétique. Nous aurions pu en choisir plus – ou moins. Nous pensons néanmoins que les dix mesures suivantes couvrent les questions les plus importantes liées au développement énergétique durable d'ici à 2020.

1. Recueillir les fruits de réformes favorisant l'économie de marché et d'une réglementation appropriée. De façon générale, les pouvoirs publics devraient se retirer de la gestion directe des marchés de l'énergie et se limiter à fixer des règles saines administrées par des organes de réglementation impartiaux. Les mots clés sont : libéralisation, commerce, privatisation et, plus généralement, choix offert aux usagers. Les réformes favorisant l'économie de marché devraient tenir compte du lien de plus en plus étroit

qui existe entre gaz, liquides et électricité. Ces réformes doivent être claires et mises en œuvre dans un délai raisonnable afin de réduire les frais de transaction eu égard, en particulier, à l'incertitude accrue inhérente à ce type de réforme. Il est essentiel que des organes impartiaux étrangers à toute influence politique à court terme définissent et appliquent une réglementation appropriée et équilibrée.

Le CME a publié un résumé complet des avantages et des risques afférents à la libéralisation du secteur énergétique dans 33 pays et régions. Ce résumé, actualisé, porte maintenant sur plus de 100 pays et peut être consulté par voie électronique dans le système mondial d'information du CME. Un rapport spécial sur la législation énergétique en Europe centrale et orientale est également disponible. Lors du 18^{ème} Congrès mondial de l'énergie, qui se tiendra à Buenos Aires en 2001, il sera examiné une étude spéciale sur les marchés de l'énergie en transition d'Amérique latine et des Caraïbes, ainsi qu'une version actualisée de l'évaluation mondiale de la libéralisation du secteur de l'énergie.

2. Garder en vue toutes les solutions énergétiques.

L'adaptation des systèmes énergétiques aux nouvelles réalités économiques est soit lente, soit onéreuse. Il faut pouvoir mettre sur pied de nouvelles formes d'énergie qui compenseront la nature finie de certaines sources d'énergie existantes ou qui utiliseront les techniques de façon différente pour atténuer les effets néfastes des modes actuels de production ou de consommation d'énergie. La diversification énergétique, l'intégration régionale des systèmes énergétiques et le renforcement du commerce des services énergétiques sont autant de stratégies qui conviendront.

Il ne fait aucun doute que jusqu'en 2020, l'utilisation des combustibles fossiles et le rôle de l'hydroélectricité demeureront importants dans le monde, un accent particulier étant toutefois placé sur le rôle du gaz naturel et sur l'introduction de systèmes efficaces et moins polluants de combustion de matières fossiles. Il n'est pas rationnel, cependant, de compter uniquement sur ces sources d'énergie pour satisfaire la demande croissante d'électricité, surtout si chaque individu peut y accéder équitablement.

Si certains membres du CME mettent en doute l'avenir de l'énergie nucléaire, la plupart d'entre eux estiment qu'il faudrait, pour continuer de développer cette source d'énergie, commencer par stabiliser son rôle. Ces derniers estiment qu'il faut encourager les activités visant à mettre au point des techniques nucléaires intrinsèquement sûres et économiques.

Vu les caractéristiques des systèmes énergétiques, il faudrait mettre en œuvre dans les régions présentant un important potentiel des politiques visant à développer et à financer l'utilisation de l'hydroélectricité, de nouvelles énergies renouvelables et de

systèmes hybrides. Enfin, les principes du marché doivent prévaloir dans la mise en valeur de toutes les ressources énergétiques.

3. Réduire le risque politique inhérent aux investissements importants opérés dans des projets énergétiques. Comme on l'a vu par le passé, les dévaluations arbitraires de la monnaie nationale, les modifications du régime fiscal et les obstacles s'opposant au rapatriement des bénéfices créent un risque politique qui accroît le coût des investissements, en particulier dans les pays en développement. Il est possible de souscrire, au niveau bilatéral, une assurance sur les risques non commerciaux dont le niveau maximum est insuffisant pour la plupart des investissements opérés dans le secteur de l'énergie.

En raison de ces risques, les investissements étrangers et, parfois, nationaux sont plus onéreux dans un pays pauvre que dans un pays riche. Les réformes favorisant l'économie de marché contribueront à créer un environnement plus propice aux investissements, mais les systèmes existants de couverture des risques non commerciaux sont conçus pour l'industrie manufacturière et sont nettement insuffisants pour faire face à l'ampleur des risques liés aux importants investissements énergétiques. Il faudrait que les gouvernements et les banques examinent soigneusement les modalités d'un programme mondial de coassurance qui couvrirait, dans les pays en développement, le risque politique lié aux nouveaux projets énergétiques commerciaux réduisant les émissions locales et la production de gaz à effet de serre. Un tel programme pourrait être financé par des pays en développement et des pays développés, et être mis en œuvre par la Banque mondiale en association avec d'autres

organismes internationaux de financement du développement.

Le CME a réalisé une étude sur le financement du secteur mondial de l'énergie, qui l'aidera à définir, avec la Banque mondiale et avec des banques régionales de développement, la structure et les critères d'un programme mondial de coassurance des investissements énergétiques. Il œuvrera également, avec l'Organisation de coopération et de développement économiques, à l'élaboration des critères d'une action renouvelée des pays industrialisés en faveur de l'accessibilité et de l'acceptabilité de l'énergie.

4. Fixer le prix de l'énergie de façon à couvrir les coûts et à en garantir le paiement. L'énergie, quelle qu'elle soit, n'est pas un bien public gratuit. Son prix doit intégrer tous les coûts variables de maintenance et de développement; par ailleurs, il faut mettre en place un système fiable garantissant que les consommateurs d'énergie paient leur consommation.

Les prix à la consommation influent de façon déterminante sur la consommation d'énergie. Sauf lorsqu'ils reflètent des coûts marginaux à long terme (coûts variables, d'entretien et de développement du capital) y compris, dans toute la mesure possible, le coût d'externalités bien identifiées telles que la sécurité énergétique ou la protection de l'environnement, ils faussent le comportement des individus, ont un effet pervers sur la mesure du produit intérieur brut (PIB), et l'ensemble de l'économie risque d'en souffrir. La suppression du subventionnement de l'énergie et des subventions croisées, par exemple dans les secteurs du transport et de l'électricité, devrait être une priorité, de même que l'établissement d'un système cohérent de taxation de l'énergie. Parallèlement à des prix reflétant les coûts, il est essentiel de mettre en place un système viable de

paiement de l'énergie commerciale.

Le CME a réalisé, pour la région Asie-Pacifique, une étude spécialisée sur les mécanismes de commerce de l'électricité et il organise, en Europe centrale et orientale, en Amérique latine et en Afrique, des ateliers ou des forums régionaux sur les systèmes d'établissement des prix et de paiement. Une vaste étude sur l'établissement du prix de l'énergie dans les pays en développement sera publiée à la fin de 2000.

5. Favoriser une augmentation du rendement énergétique.

L'intensité énergétique est directement liée aux signaux donnés par les prix tandis que le rendement énergétique dépend davantage de la diffusion des techniques les plus efficaces par rapport au coût. Il est indispensable d'introduire, pour ce qui est des équipements et des services énergétiques, des normes juridiques minimales. Il est impératif de mettre en place un système de compteurs et de paiement de l'énergie si l'on veut découpler la consommation d'énergie de la croissance du PIB.

Les politiques de maîtrise de l'énergie utilisant des mécanismes directs ou indirects de détermination des prix (suppression de subventions ou incorporation des externalités, par exemple) sont le meilleur moyen de réduire la consommation d'énergie. Cependant, même sans modifier le cadre global des prix, il est nécessaire de mener de telles politiques pour pallier les lacunes du marché. Les normes de rendement énergétique favorisent également la croissance du PIB en accroissant la productivité marginale de l'énergie ou en améliorant, avec la même énergie, le bien-être tant économique qu'environnemental. Ici encore, la mise de normes juridiques et d'un système adéquat de paiement est

indispensable à une bonne maîtrise de l'énergie.

6. Encourager la formation de partenariats visant à financer des projets environnementaux. Les mesures prises au niveau national pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans les pays industrialisés, sont à elles seules méritoires. Dans le contexte de l'atténuation du changement climatique, en effet, les pays industrialisés sont encouragés à agir en premier lieu et avant tout au niveau national. Cependant, vu l'énorme besoin en capitaux nouveaux qui caractérise les pays en développement, des mécanismes internationaux capables de stimuler l'afflux de fonds liés à des projets d'énergie propre et sûre mis en œuvre dans ces pays offrent un complément valable qui devrait intéresser au plus haut point les gouvernements. Les principales possibilités de réduction à faible coût des émissions de gaz à effet de serre résident en effet dans les pays en développement.

Il faudrait encourager la création de coentreprises mettant en œuvre des programmes spécifiques d'amélioration de l'accessibilité et de l'acceptabilité de l'énergie. Des mécanismes mondiaux stimulant la coopération internationale entre pays développés et pays en développement sont actuellement en discussion; il faudrait les mettre en œuvre de façon viable et sans délai. Il faudrait concevoir des règles claires et simples de certification de la réduction des émissions résultant de ces projets ainsi qu'un programme explicite d'incitation à la mise en conformité fonctionnant comme un signal lié aux prix et comme un système de plafonnement du coût. Ces partenariats devraient, dans l'idéal, viser à faciliter les réformes économiques, à mettre sur pied de nouvelles infrastructures énergétiques propres ou à

promouvoir des projets réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Le programme pilote de réduction des émissions de gaz à effet de serre du CME a rassemblé des données, disponibles électroniquement, concernant d'importants projets énergétiques mis en œuvre dans le monde et portant sur la réalisation d'objectifs relatifs à l'accessibilité et à l'acceptabilité de l'énergie d'ici à 2005. Grâce à la méthodologie et aux critères utilisés, cette base de données pourra, si le CME autorise son utilisation publique, aider les investisseurs, banquiers, services publics et compagnies de distribution d'énergie à attirer des financements et à obtenir des autorisations réglementaires. La confiance dans la base de données se développant, il serait possible d'étendre le programme à des secteurs liés à l'énergie tels que l'agriculture et les transports. Une prolongation au-delà de 2005 pourrait être envisagée une fois que les résultats des projets existants auront été vérifiés par des organismes indépendants.

7. Garantir aux pauvres une énergie économiquement abordable. Les politiques économiques et sociales favorisant une répartition équitable des revenus sont le meilleur moyen d'aider les pauvres. L'expérience montre que ces politiques contribuent à la croissance économique de l'ensemble du pays. Pour cela, cependant, elles doivent s'accompagner de programmes sectoriels adéquats.

Dans le secteur énergétique, les gouvernements devraient, pour que l'énergie devienne abordable pour les pauvres, accepter d'absorber tout ou partie des dépenses à fonds perdus consenties pour la construction des infrastructures nécessaires à la desserte de ces derniers; concevoir, pour l'électricité permettant d'assurer à faible coût la charge de base destinée aux services

essentiels, des signaux liés aux prix reflétant les coûts en utilisant des compteurs de puissance limités; favoriser les systèmes d'énergies renouvelables décentralisés dans les zones rurales, où le coût de leur cycle de vie est comparable ou inférieur à celui de l'extension du réseau; et renforcer les moyens des compagnies locales de distribution d'énergie en formant leurs administrateurs et autres personnels – techniques et commerciaux – à différents aspects de leur activité, y compris à la maintenance des installations locales.

8. Financer la recherche-développement et le déploiement. Cette activité, qui vise le "bien commun" ou le partage des avantages au profit de tous, nécessite un financement public suffisant. Ces dépenses seront plus rationnelles si elles s'effectuent dans un cadre concurrentiel. Au niveau international, il faudrait encourager la coopération intergouvernementale pour limiter les chevauchements tout en maximisant la concurrence. Au niveau national, des organismes indépendants – universitaires, industriels et publics – devraient superviser le partage et l'affectation du budget.

Il devrait exister des programmes de recherche-développement suffisamment financés dans les domaines prioritaires suivants : rendement énergétique, sur le plan tant de la production que de l'utilisation finale; toutes énergies renouvelables au stade du développement; piégeage du carbone dans des réservoirs souterrains/aquifères ou en profondeur dans l'océan; systèmes plus propres à base de combustibles fossiles; énergie nucléaire, où les dépenses devraient se concentrer sur les centrales évolutives (REO), sur des modèles révolutionnaires intrinsèquement sûrs pouvant

convenir à des pays en développement, ainsi que sur le stockage, le traitement et l'évacuation des déchets; supraconductivité devant permettre de réduire les pertes liées à la transmission et à la transformation et de stocker l'électricité; systèmes énergétiques décentralisés intégrés et systèmes tampons conçus pour permettre de brèves variations de puissance.

Le CME a entrepris, s'agissant des progrès des techniques énergétiques au XXI^e siècle, une importante étude dont il sera rendu compte au 18^{ème} Congrès mondial de l'énergie en 2001.

9. Améliorer l'éducation et l'information. L'éducation et l'information nécessitent un débat ouvert, transparent, indépendant, animé et provocant. Il est nécessaire, dans le domaine énergétique, de financer au niveau national ou international (et dans les pays aussi bien développés qu'en développement) des institutions efficaces. L'initiative du CME visant à mettre sur pied un système mondial d'information sur l'énergie relié à des bases de données régionales, et la décision qu'il a prise d'actualiser le rapport *Energy for Tomorrow's World* sont autant de pas dans la bonne direction. Le programme universitaire du Congrès mondial triennal du CME représente un autre effort louable d'amélioration de l'enseignement.

10. Faire de l'éthique une composante importante de l'administration des systèmes énergétiques. Dans une société mondialisée, les compagnies qui opèrent au niveau international doivent se comporter comme des citoyens du monde. Elles doivent non seulement respecter les lois et règlements nationaux, mais aussi faire progresser, dans le monde, la résolution des problèmes liés à l'énergie et à l'environnement. Une éthique commerciale fondamentale – englobant

notamment honnêteté et refus de toute pratique de corruption – est essentielle, mais la nécessité de l'éthique va bien au-delà de ces aspects. Les compagnies, dans toutes leurs centrales et dans tous les pays où elles opèrent, devraient encourager la réalisation d'audits énergétiques et environnementaux volontaires, la large diffusion des résultats de ces audits, l'application des normes communes de sûreté, de résultat et de pratique industrielle, et le respect des travailleurs. Tels sont les ingrédients supplémentaires de l'administration mondiale des institutions et des entreprises que nous préconisons ici.

Le CME a réalisé des études de cas sur les dimensions éthiques du commerce de l'énergie, qui feront l'objet d'une table ronde au 18^{ème} Congrès mondial de l'énergie en 2001.

AGIR MAINTENANT

Dans sa Déclaration, le CME a délibérément placé l'accent sur les deux décennies qui nous séparent de 2020. Il s'agissait d'anticiper les changements de manière plus fiable et d'envisager plus clairement les mesures à prendre. Nous proposons cette analyse des faits récents et les recommandations qui y figurent aux gouvernements, aux dirigeants commerciaux et au grand public. Nous espérons avoir contribué à mieux faire comprendre le rôle joué par l'énergie dans le tissu politique et social des individus, des sociétés, des régions et des pays du monde entier.

Il importe de noter que la chronologie et la portée de l'action des gouvernements ou des compagnies varieront d'un pays à l'autre en fonction de la maturité et de la stabilité de leur économie. Nous avons tenté de réfléchir globalement à un développement énergétique durable de façon à stimuler l'action locale.

Le secteur de l'énergie est manifestement la clé d'un accès élargi aux services énergétiques commerciaux et d'une offre ininterrompue d'électricité et de produits énergétiques plus acceptables sur les plans social et environnemental. La rapidité, l'ampleur et la nature de cette évolution dépendent en partie de la capacité à valoriser les structures, les souhaits et le soutien d'autres acteurs sociaux et à déployer les moyens techniques et financiers nécessaires.

L'absence de prise de conscience, d'éducation et d'engagement quant à la politique énergétique nécessaire ainsi que des moyens requis pour la mettre en œuvre sont quelques-uns des principaux obstacles à sa réussite. Ces obstacles nuisent aussi bien aux responsables politiques, aux pouvoirs publics, aux industriels qu'au public. Ils renforcent les réticences de certains à soutenir des politiques originales promouvant un développement énergétique plus viable. Ils dissuadent les consommateurs de modifier leurs attitudes et habitudes. Ils dissuadent également les actionnaires et d'autres investisseurs d'accompagner le changement.

Les scénarios du CME visent désormais l'horizon 2050 et au-delà. Personne ne peut ignorer la perspective à long terme dans laquelle se développeront les services énergétiques modernes. Nos avis et recommandations favorisant la production et l'utilisation durables de l'énergie pour le bien de tous, ce que nous accomplirons d'ici à 2020 contribuera de façon décisive, nous l'espérons, à la création d'un monde viable pour de nombreuses décennies à venir. C'est pourquoi le Conseil mondial de l'énergie est déterminé à centrer son action sur les objectifs énergétiques et à contribuer à appliquer toutes les mesures contenues dans la présente Déclaration. □

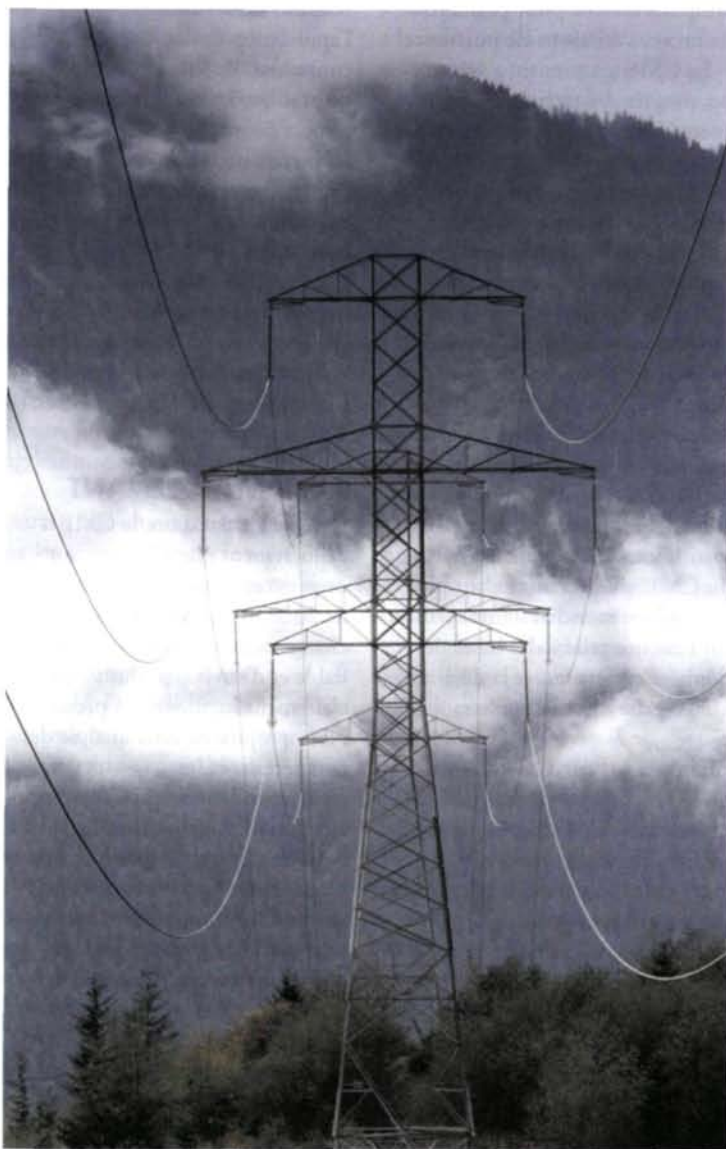
DÉVELOPPEMENT DES MOYENS D'ÉVALUATION COMPARATIVE DE LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE DÉVELOPPER L'INFRASTRUCTURE ÉNERGÉTIQUE

BRUCE HAMILTON, GUENTER CONZELMANN ET DUY THANH BUI

L'analyse des systèmes énergétiques nationaux atteint des degrés de complexité sans précédent. Outre l'incertitude liée à l'évolution de la demande d'énergie, des progrès technologiques et des coûts, les planificateurs et décideurs se heurtent à des questions telles que la protection de l'environnement, le développement durable, la déréglementation et la libéralisation des marchés. Dans le même temps, les crédits publics destinés aux projets d'investissement énergétique se réduisent progressivement.

L'AIEA propose à ses États Membres un programme complet d'assistance technique et de coopération couvrant diverses questions liées aux utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire. Dans le domaine de l'évaluation comparative de la situation énergétique, cette assistance a pour but de renforcer les moyens nationaux d'élaboration de modes viables d'offre et de consommation d'énergie. Elle revêt trois formes :

- diffusion de méthodes et d'outils sophistiqués de prise de décision adaptés aux besoins particuliers des pays en développement;
- offre d'une formation à l'application de modèles, à l'interprétation de résultats et à leur traduction en décisions ou en mesures;
- réalisation d'études nationales en coopération avec les États Membres demandeurs.



Credit: Russel Illay/PhotoDisc

M. Hamilton et M. Bui sont employés à la Section de la planification et des études économiques de l'AIEA (Département de l'énergie nucléaire). M. Conzelmann dirige la Section des études nationales et internationales au Laboratoire national d'Argonne (États-Unis).

Photo : L'AIEA aide de nombreux pays à planifier le développement de leurs systèmes de production d'électricité.

MÉTHODES ET OUTILS D'ANALYSE DE LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE

L'AIEA propose, depuis longtemps, des données, des informations et des outils d'analyse qui permettent de prendre en connaissance de cause des décisions quant à la meilleure façon de répondre aux besoins énergétiques d'un pays.

Planification fondée sur le moindre coût dans les années 70 et 80. Au début des années 70, l'AIEA a commencé à soutenir le développement et l'application d'outils d'analyse des systèmes électriques utilisés par les États Membres pour analyser le rôle potentiel de l'énergie nucléaire. Les projections de demande d'électricité étant un déterminant important du besoin d'énergie nucléaire, les premières activités ont notamment consisté à mettre au point le Modèle pour l'analyse de la demande d'énergie (MAED). Ce modèle est utilisé par les pays en développement pour établir des prévisions de demande d'électricité correspondant à leurs objectifs et à leurs moyens économiques et industriels.

L'AIEA a conçu le MAED en collaboration avec l'Institut économique et juridique de l'énergie de Grenoble (France) et avec l'Institut international d'analyse des systèmes appliqués de Laxenburg (Autriche). Ce modèle offre un cadre de simulation souple permettant d'étudier l'influence des changements sociaux, économiques, technologiques et politiques sur l'évolution à long terme de la demande d'énergie. Un accent particulier est placé sur la prévision de la demande d'électricité, non seulement sur le plan des besoins annuels totaux, mais aussi sur celui de la répartition heure par heure de la demande d'énergie sur l'année. Ces résultats sont un élément essentiel de toute analyse de

développement des systèmes énergétiques.

Le Programme de planification automatique des systèmes de Vienne (Wien Automatic System Planning Package – WASP) sert à déterminer le développement à long terme économiquement optimal d'un système de production d'électricité. Le modèle WASP, conçu en 1972 pour l'AIEA par la Tennessee Valley Authority (TVA, États-Unis), est depuis cette date l'outil de l'Agence le plus populaire et le plus durablement utilisé de planification du secteur de l'électricité.

On notera que le WASP a été conçu à une époque où la plupart des pays considéraient l'électricité comme un bien stratégique. Ceux-ci avaient établi un service public verticalement intégré chargé de produire, de transmettre et de distribuer l'électricité. Avec ce type de structure du système électrique, on peut analyser l'exploitation et le développement du système de manière relativement simple et directe. On peut modéliser la répartition des unités sur la base du coût variable le plus faible, incorporer comme contraintes les exigences de fiabilité du système, planifier le développement en fonction de la valeur actualisée du coût le plus faible à l'échelle du système, et déterminer le rôle de l'énergie nucléaire et des autres modes de production en fonction du coût relatif de leur cycle de vie.

Analyse financière, évaluation des contraintes environnementales et analyse intégrée des systèmes énergétiques dans les années 90. La recherche d'investissements destinés aux moyens de production d'électricité sur des marchés de l'électricité et de la finance de plus en plus libéralisés peut ne pas avoir grand chose à voir avec les stratégies d'investissement de services publics dans des conditions de monopole. Pour aider à répondre aux besoins

changeants des planificateurs et des décideurs du secteur énergétique, l'AIEA a mis au point, en collaboration avec le Crédit Lyonnais (Paris, France) et avec la Commission pakistanaise de l'énergie atomique (PAEC, Islamabad, Pakistan), un programme d'analyse financière appelé FINPLAN.

FINPLAN sert à évaluer les conséquences financières d'un programme de développement énergétique fondé sur certains "ratios" que les institutions financières prennent en compte pour estimer la viabilité d'un projet ou programme d'investissement. En outre, FINPLAN sert à déterminer le prix de vente de l'électricité qui permettrait d'amortir les investissements. Les prévisions établies à l'aide de ce modèle tiennent compte de la sensibilité des prix aux taux de change, de la fluctuation de la demande, et des taux d'inflation prévisibles des monnaies tant nationales qu'étrangères. Le modèle intègre également des éléments de fiscalité simplifiés tels que le calcul des recettes prises en compte pour les déductions au titre des taux d'intérêt, les pertes déclarées passées, les amortissements possibles et les taux d'imposition proportionnels.

L'élaboration d'un ensemble d'outils informatiques d'analyse de la situation énergétique et environnementale a débuté en 1993 dans le cadre du Projet conjoint inter-agences de l'AIEA sur les bases de données et les méthodologies utilisées pour l'évaluation comparative des différentes sources d'énergie servant à la production d'électricité (DECADES). Ces outils comprennent des bases de données et des programmes d'analyse qui peuvent servir à évaluer les compromis possibles entre les aspects techniques, économiques et environnementaux de différentes techniques, chaînes et systèmes de production d'électricité.

ÉVALUATION COMPARATIVE: ANALYSE DES FUTURES OPTIONS ÉNERGÉTIQUES AU VIET NAM

Dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA engagé en 1997, une équipe de travail nationale vietnamienne a utilisé divers outils informatiques pour analyser le développement énergétique du pays. Cette équipe a utilisé le Programme d'évaluation de l'énergie et de l'électricité (ENPEP) pour prévoir la demande d'énergie et d'électricité (à l'aide du Modèle pour l'analyse de la demande d'énergie (MAED); déterminer le développement à long terme optimal du système de production d'électricité (au moyen du Programme de planification automatique des systèmes de Vienne (WASP); et estimer les contraintes environnementales liées à la production d'électricité (à l'aide d'un module ENPEP baptisé IMPACTS).

Le Viet Nam est en train de passer rapidement d'une économie agricole à une économie industrielle et a connu ces dernières années une croissance économique considérable qui devrait se poursuivre jusqu'en 2020. Du fait de l'urbanisation accélérée et de l'élévation du niveau de vie et des dépenses de consommation, la demande d'électricité devrait croître rapidement. Les spécialistes nationaux de l'électricité estiment que la charge de pointe annuelle du système interconnecté passera de 2,75 GWe en 1995 à 24,32 GWe en 2020. Le taux de croissance annuel moyen estimatif est de 9,1% avec des taux de croissance supérieurs au début (jusqu'à 11,5%) et inférieurs à la fin (6,7%) de la période étudiée. Cette évolution est essentiellement due à la croissance rapide de la demande d'électricité émanant de l'industrie, des services et des ménages urbains.

Les résultats de l'étude de développement du système de production montrent que dans le scénario de référence, l'hydroélectricité et le gaz naturel satisferont l'essentiel des besoins énergétiques du pays. Cependant, on prévoit que la part de l'hydroélectricité, du pétrole et du charbon chutera sensiblement pendant la période 1995-2020 au profit du gaz naturel et du nucléaire. L'hydroélectricité devrait passer d'environ 70% à environ 52% de la puissance installée totale. De leur côté, la part du pétrole devrait passer d'environ 9% à 2% tandis que celle du charbon devrait passer de 16% à 9%. En revanche, les centrales à cycles combinés fonctionnant au gaz naturel devraient voir leur part passer de 5% à 29%. Cette croissance importante s'appuiera sur les ressources en gaz naturel du pays, qui dispose de réserves avérées estimées à 6 000 milliards de pieds cubes et de réserves probables pouvant atteindre 10 000 milliards de pieds cubes. La première centrale nucléaire devrait commencer de fonctionner en 2017, atteignant une production totale d'environ 2500 MWe en 2020, niveau représentant 7,7% de la puissance installée totale de production d'électricité.

L'équipe nationale a également estimé les émissions futures de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité en exportant la configuration optimale de développement du système électrique du modèle WASP vers le module environnemental de l'ENPEP appelé IMPACTS. Ce module calcule les rejets de polluants dans l'atmosphère en fonction de la consommation de combustible projetée par le modèle WASP et de facteurs d'émission standard disponibles dans l'une de ses bases de données. Les résultats montrent une augmentation considérable des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité.

Les émissions provenant des centrales alimentées au charbon augmentent jusqu'en 2007, aussi longtemps que la production de charbon augmente.

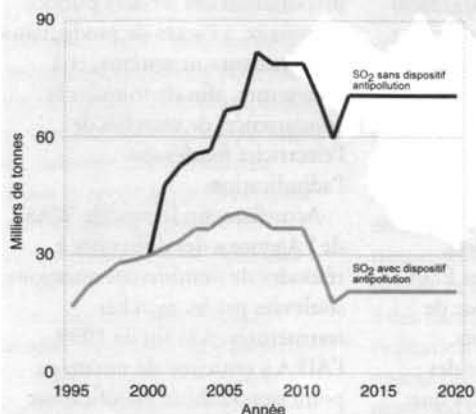
Cette tendance s'infléchit sensiblement pendant la seconde moitié de la période étudiée, les centrales au charbon existantes étant retirées et un nombre important de centrales hydroélectriques et de centrales à cycles combinés fonctionnant au gaz naturel entrant en service parallèlement au nucléaire (à partir de 2017). En 2020, le gaz naturel représentera, au Viet Nam, 61% des émissions de CO₂ provenant du secteur de l'électricité.

Il existe, en matière d'émissions projetées, une différence notable entre le sud et le nord du pays. Au Viet Nam, les centrales au charbon sont situées essentiellement dans le nord, où se trouvent la majorité des réserves de charbon du pays, ce qui explique la concentration des émissions de SO₂ dans la région septentrionale (83% en 2020). La mise hors service et le remplacement des centrales au charbon anciennes et inefficaces après 2007 expliquent la diminution importante des émissions de SO₂ dans le nord observée pendant la seconde moitié de la période de projection. Les réserves de pétrole et de gaz, en revanche, sont situées dans la partie méridionale (principalement en mer), alimentant la forte croissance de la production d'électricité à base de gaz. Cette situation explique pourquoi on prévoit que le sud produira, en 2020, environ 62% des émissions de CO₂ et 70% des émissions de NO_x.

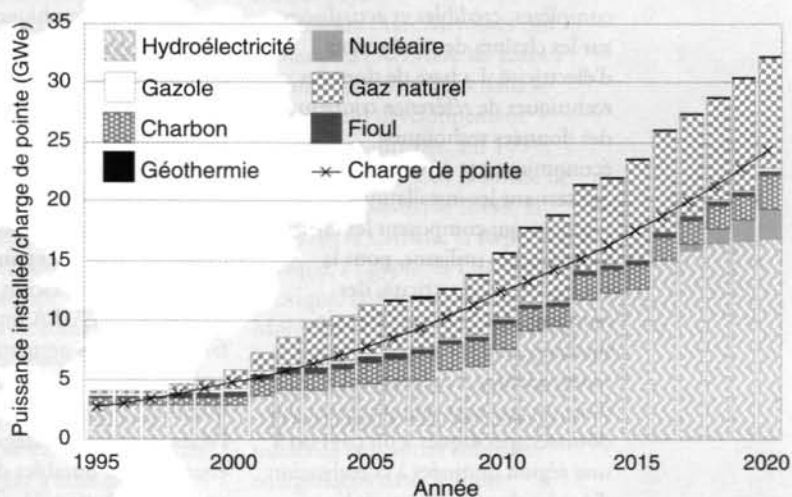
L'équipe nationale a également analysé les coûts qu'entraînerait le respect de la réglementation vietnamienne relative à la limitation des émissions de matières sous forme de particules et de dioxyde de soufre. Pour limiter les émissions de particules, l'équipe a envisagé d'utiliser des précipitateurs électrostatiques ayant un rendement de 97% dans les centrales existantes et de 99% dans les nouvelles centrales. Pour respecter les taux plafonds d'émission de SO₂ dans les nouvelles centrales à charbon, les experts nationaux ont envisagé de recourir à une désulfuration à sec des gaz de combustion ayant un rendement de 70% dans les nouvelles centrales à charbon brûlant de l'antracite locale à faible teneur en soufre (0,52%) et de 90% dans les nouvelles centrales à charbon brûlant du charbon bitumineux importé à moyenne teneur en soufre (1,62%). Le module IMPACTS a alors été utilisé pour estimer, à l'échelle du système, le coût du respect de la réglementation relative à la protection de l'air.

L'analyse a porté, en particulier, sur les coûts qu'entraînerait le respect de la limitation des émissions de SO₂ dans le nord du Viet Nam. Les résultats ont montré qu'à la fin de la période étudiée, les émissions seraient ramenées de 71 000 à 21 300 tonnes. Dans l'ensemble du pays, on éviterait, grâce aux technologies antipollution, le rejet de 858 000 tonnes de SO₂ pendant la période étudiée. Ces réductions représentent un coût total actualisé de 180,4 millions de dollars (à un taux d'actualisation de 10%), soit environ 210 dollars par tonne de SO₂ évitée. On estime à 282 millions de dollars le coût total actualisé du respect des normes environnementales pour les matières sous forme de particules et pour le SO₂.

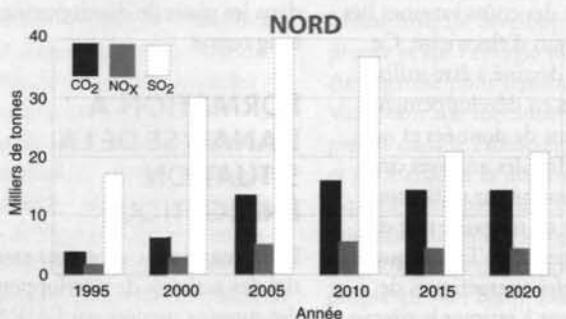
ÉMISSIONS AVEC ET SANS DISPOSITIFS ANTIPOLLUTION DANS LE NORD DU VIET NAM



DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE VIETNAMIEN (SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE)

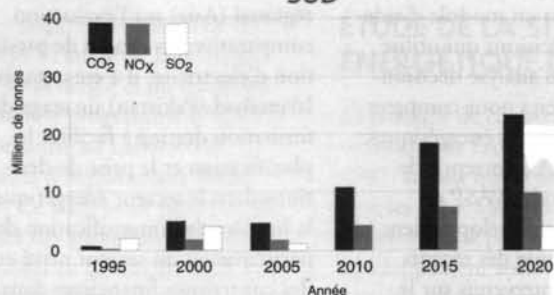


ÉMISSIONS RÉGIONALES (PROJECTION) LIÉES À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ AU VIET NAM

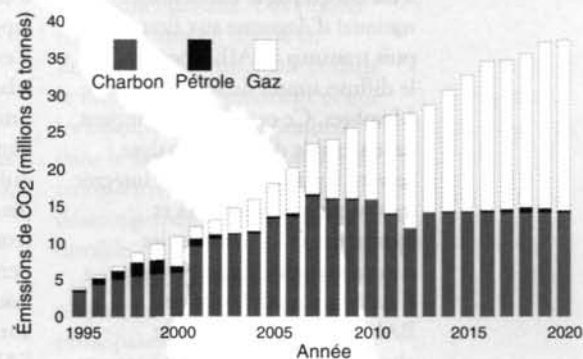


CO₂: fois 10⁶ tonnes
NO_x: fois 10³ tonnes
SO₂: fois 10³ tonnes

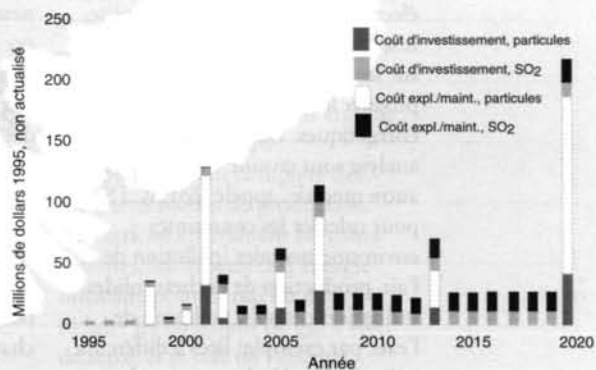
SUD



ÉMISSIONS (PROJECTION) DE CO₂ AU VIET NAM LIÉES À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



COÛT (PROJECTION) DU RESPECT DES NORMES ENVIRONNEMENTALES AU VIET NAM (PARTICULES ET SO₂)



Deux types de bases de données techniques ont été mis au point pour fournir des informations complètes, crédibles et actualisées sur les chaînes de production d'électricité. La base de données techniques de référence contient des données techniques, économiques et environnementales concernant les installations typiques qui composent les chaînes énergétiques utilisant, pour la production d'électricité, des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et des sources d'énergie renouvelables. Les bases de données par pays comprennent des données spécifiques à un pays ou à une région destinées à la réalisation d'études de cas au moyen du programme d'analyse DECADES.

Le Programme d'évaluation de l'énergie et de l'électricité (ENPEP) a été conçu par le Laboratoire national d'Argonne aux États-Unis, puis transmis à l'AIEA pour qu'elle le diffuse auprès de ses États Membres. Ce programme contient un ensemble d'outils d'analyse servant à planifier de façon intégrée les systèmes énergétiques et électriques et à quantifier les contraintes environnementales. L'un de ses modules, appelé BALANCE, sert à suivre le cheminement de l'énergie à travers l'ensemble du système énergétique, de l'extraction des ressources à leur conversion en passant par leur traitement, à répondre aux demandes d'énergie utile (chauffage, transports, appareils électriques, par exemple). Il utilise une méthode de simulation fondée sur les principes du marché pour projeter les futurs bilans énergétiques. Les résultats de cette analyse sont ensuite transmis à un autre module, appelé IMPACTS, pour calculer les contraintes environnementales (pollution de l'air, production de déchets solides, utilisation des sols, pollution de l'eau, par exemple) liées à différents scénarios de développement du secteur énergétique.

La version la plus récente de ce programme, utilisable sur ordinateur personnel, comporte une interface graphique largement améliorée permettant de visualiser et de modifier à l'écran un réseau énergétique représentatif. Elle permet également de mieux évaluer la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Répondre à des besoins évolutifs en 2000 et au-delà. L'évolution des besoins des États Membres de l'AIEA impose de faire des efforts permanents, notamment pour résoudre des questions importantes telles que l'élaboration de stratégies énergétiques durables dans le contexte d'Action 21, de la déréglementation des marchés et de la privatisation.

En 2000, l'Agence achèvera d'élaborer une méthode simplifiée (appelée B-Glad) d'estimation et d'évaluation des coûts externes liés à la production d'électricité. Ce programme destiné à être utilisé dans les pays en développement qui manquent de données et ne peuvent s'offrir des analyses coûteuses fonctionne sur ordinateur personnel et ne nécessite que des données minimales. Tandis que les autres modèles énergétiques de l'AIEA servent à estimer le niveau de contraintes environnementales liées à différentes solutions énergétiques, le modèle B-Glad sert à analyser la dispersion et le transport des polluants, à déterminer les effets sanitaires et environnementaux connexes et à évaluer ces effets. Le modèle B-Glad contient également un module d'aide à la prise de décisions qui utilise des méthodes d'analyse décisionnelle multicritères pour comparer différentes solutions énergétiques.

Enfin, l'AIEA a entrepris de revoir sa méthode WASP de planification du développement pour tenir compte des récents changements intervenus sur le marché de l'électricité. Parallèlement à la restructuration

des systèmes de production d'électricité dans le monde, on assiste, à divers degrés, à la privatisation des services publics nationaux, à l'accès de producteurs indépendants au système, et à l'ouverture, afin de stimuler la concurrence, de marchés de l'électricité fondés sur l'adjudication.

Actuellement, le modèle WASP de l'Agence a des difficultés à résoudre de nombreuses questions soulevées par les marchés restructurés. À la fin de 1999, l'AIEA a entrepris de mettre au point des outils de planification des systèmes électriques capables de mieux aider les pays à déterminer comment les centrales nucléaires existantes peuvent affronter la concurrence sur le nouveau marché de l'électricité et comment de nouvelles centrales nucléaires pourraient s'intégrer dans les plans de développement à long terme.

FORMATION À L'ANALYSE DE LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE

La formation est un aspect essentiel des activités de développement des moyens menées par l'AIEA. Depuis 1978, plus de 1000 experts originaires de 73 pays ont participé à des stages régionaux et interrégionaux de formation à la planification énergétique organisés par l'Agence. Trois stages de ce type ont été proposés en 1999.

Dans le cadre d'un projet régional (Asie) sur l'évaluation comparative des modes de production d'électricité, il a été organisé à Islamabad (Pakistan) un stage de formation destiné à faciliter la planification et la prise de décisions dans le secteur énergétique à la lumière de l'intensification de la participation du secteur privé et des contraintes financières dans le secteur de l'électricité. Cette formation a principalement porté sur

la façon dont les outils de planification des systèmes électriques de l'AIEA peuvent servir à analyser des technologies de différentes générations et des contrats de producteurs indépendants pour élaborer des plans de développement des systèmes électriques qui soient peu onéreux, financièrement viables et respectueux des limites fixées au niveau national en matière d'émission de polluants de l'air.

Un stage régional (Europe) intitulé "Évaluation comparative de l'énergie nucléaire et d'autres modes et stratégies de production d'électricité à l'appui d'un développement énergétique durable" a été organisé à Trieste (Italie). Cette formation a essentiellement consisté en la réalisation d'une étude comparative par chacune des équipes nationales participantes. Les principales composantes de l'étude étaient les suivantes : 1) élaboration d'une base de données de pays répertoriant les caractéristiques techniques, économiques et environnementales des installations énergétiques et des combustibles utilisés; 2) caractérisation de l'intégralité des chaînes de production d'électricité en termes de coûts connexes, d'émissions de polluants de l'air, de production de déchets solides et d'utilisation des sols; 3) élaboration de plans économiques de développement des systèmes électriques; et 4) évaluation des contraintes environnementales liées à d'autres stratégies de développement des systèmes électriques.

Un stage interrégional de formation à l'étude de la planification de l'énergie et du nucléaire utilisant le programme ENPEP a été organisé au Laboratoire national d'Argonne aux États-Unis. Ce stage avait pour but de former des spécialistes d'États Membres en développement aux méthodes de planification intégrée de l'énergie et de l'électricité et de quantification des contraintes

environnementales liées à différents scénarios de développement du secteur énergétique. Les principaux points abordés étaient notamment : aperçu des concepts et de la terminologie relatifs à la planification des systèmes énergétiques nationaux, caractérisation des chaînes énergétiques, rapports existant entre la planification énergétique, économique et environnementale, potentiel de réduction de la demande d'énergie grâce à des mesures de conservation, évaluation des besoins en ressources et de l'impact environnemental des systèmes énergétiques, méthodes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, réalisation d'études nationales à l'aide du programme ENPEP, et préparation et présentation d'un rapport d'étude.

Outre ces stages de formation, un séminaire national sur le Mécanisme de développement propre et sur l'énergie nucléaire a été organisé pour sensibiliser le Viet Nam aux mécanismes souples prévus dans le Protocole de Kyoto, et pour étudier la mesure dans laquelle l'énergie nucléaire pourrait convenir comme technologie de développement propre au Viet Nam. Dans le même but, il a été organisé en République tchèque un séminaire régional sur le mécanisme d'application conjointe du Protocole de Kyoto et, à Vienne, un séminaire d'information destiné aux missions résidentes auprès de l'AIEA.

ÉTUDE DE LA SITUATION ÉNERGÉTIQUE DES PAYS

La stratégie de coopération technique de l'AIEA, établie en 1997, stipule que cette coopération avec les États Membres a pour but de favoriser de plus en plus un développement socio-économique tangible en contribuant directement, d'une manière efficace par rapport aux coûts, à la

réalisation des principales priorités de développement durable de chaque pays.

Plusieurs États Membres ont demandé à l'AIEA de les aider à renforcer leurs moyens dans le domaine du développement énergétique durable. En 1999, l'Agence a aidé, sous la forme de projets nationaux, le Brésil, la Bulgarie, la Croatie, la République tchèque, l'Égypte, la Lituanie, le Mexique, la République de Moldova, la Pologne, la Slovaquie, le Soudan et le Viet Nam (*voir encadré et graphiques, pages 10 et 11*) à évaluer le rôle de l'énergie nucléaire et d'autres solutions énergétiques dans le futur développement de leur système de production d'électricité, compte dûment tenu des divers problèmes techniques, économiques et environnementaux. Des projets régionaux mis en œuvre en Europe, en Asie orientale et dans le Pacifique ont également évalué les besoins des États Membres dans le domaine de l'évaluation comparative aux fins du développement énergétique durable.

Au début des années 90, la plupart des projets consistaient principalement à déterminer le rôle de l'énergie nucléaire dans la stratégie économiquement optimale de développement du système électrique d'un pays. Plus récemment, des projets se sont mis à étudier des systèmes énergétiques fondés sur les principes du marché et à évaluer les contraintes environnementales. Les futurs projets mis en œuvre dans ce domaine devraient de plus en plus consister à dresser une comptabilité plus complète des différents modes de production d'électricité en évaluant les coûts externes, les mérites de l'énergie nucléaire pour ce qui est de réduire les émissions de gaz à effet de serre, et le rôle de l'énergie nucléaire dans les marchés de l'électricité privatisés. □

LES INDICATEURS D'UN DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE DURABLE DES OUTILS DE SUIVI DU PROGRÈS

ARSHAD KHAN, HANS-HOLGER ROGNER ET GAREGIN ASLANIAN

14

Le concept de développement durable a fait son apparition avec la publication du rapport Brundtland intitulé "Notre avenir à tous", publié en 1987 par la Commission mondiale de l'environnement et du développement. Il a reçu une nouvelle impulsion et est devenu le centre d'intérêt du monde entier avec l'adoption d'Action 21, autre nom de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement adoptée par la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED, plus connue sous le nom de Sommet de la Terre), tenue à Rio de Janeiro (Brésil) en juin 1992.

Bien qu'il n'existe toujours aucune définition universellement acceptée du développement durable, le rapport Brundtland le qualifie de "développement qui satisfasse les besoins actuels sans compromettre l'aptitude des générations futures à satisfaire leurs propres besoins".

Le programme Action 21 adopté par le Sommet de la Terre se penche sur les problèmes urgents d'aujourd'hui et vise à préparer le monde aux défis du XXI^e siècle. Ses 40 chapitres composent un plan d'action applicable par les organisations du système des Nations Unies, par les gouvernements et par les principaux groupes actifs dans chaque domaine où les humains influent sur l'environnement. Toutes les questions importantes qui ont une incidence sur l'une ou plusieurs des quatre dimensions clés de la durabilité, à savoir les

aspects sociaux, économiques, environnementaux et institutionnels, sont abordées (*voir encadré, page 15*). La tâche d'assurer un suivi efficace de la CNUED, et de surveiller et de rendre compte de l'application aux niveaux national, régional et international des accords conclus lors du Sommet de la Terre incombe à la Commission du développement durable (CDD), créée par l'Organisation des Nations Unies en décembre 1992.

Le chapitre final d'Action 21 prie explicitement les pays et les organisations de mettre au point des "indicateurs" de développement durable pouvant être utilisés pour suivre et évaluer les progrès accomplis. Le présent article passe en revue d'importantes activités mises en œuvre à cette fin et met en évidence les travaux accomplis par l'AIEA en coopération avec d'autres organisations pour élaborer un ensemble d'indicateurs de développement énergétique durable.

ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'énergie, élément essentiel du développement social et de la croissance économique, joue un rôle crucial dans notre société. Non seulement elle permet d'assurer les services élémentaires dont nous avons besoin dans notre vie quotidienne – chauffage, réfrigération, préparation des aliments, éclairage, transport, etc. – mais elle est aussi un facteur de

production indispensable dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie.

Dans le même temps, la production et la consommation d'énergie entraînent une dégradation importante de l'environnement à tous les niveaux – local, régional et mondial. Par exemple, l'utilisation de combustibles fossiles et de bois de chauffage entraînent une pollution intérieure et extérieure par les particules et les oxydes de soufre et d'azote; l'hydroélectricité endommage souvent gravement l'environnement en submergeant de vastes terres; enfin, le changement climatique lié à la concentration croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère suscite aujourd'hui de vives préoccupations de par le monde. L'épuisement des ressources naturelles, l'accumulation des déchets y compris les déchets radioactifs, la déforestation, la pollution de l'eau et la perturbation du milieu sont d'autres exemples de problèmes environnementaux liés à l'énergie.

Il existe, par ailleurs, d'importantes différences de consommation d'énergie non seulement entre pays différents,

M. Khan est employé à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA, et M. Rogner dirige cette section. M. Aslanian est vice-président du Centre de politique énergétique de Moscou. Les références complètes du présent article sont disponibles auprès des auteurs.

mais également entre les couches aisées et démunies de la population d'un même pays. Il est intéressant de noter que près de 1,6 million d'individus n'ont toujours pas accès à l'électricité ou à d'autres formes d'énergie commerciale et que les 20% les plus riches des habitants de la planète consomment 55% de l'énergie primaire, tandis que les 20% les plus pauvres n'en consomment que 5%.

La demande d'énergie augmentant partout dans le monde, on peut douter de la durabilité des réserves finies de combustible fossile de la Terre. Bien qu'à l'échelon mondial, cette préoccupation concerne le long terme, la sécurité et la continuité de l'offre d'énergie importée posent un problème immédiat aux pays qui ne disposent pas de sources d'énergie indigènes, en particulier à ceux qui dépendent fortement d'importations de pétrole et de gaz.

Ainsi, l'offre de services énergétiques adéquats, économiquement abordables, sûrs et respectueux de l'environnement est un élément essentiel du développement durable. Lorsqu'elle a passé en revue le programme Action 21, la 19^{ème} session extraordinaire de l'Assemblée générale des Nations Unies, qui a eu lieu en 1997 (Sommet de la Terre + 5), a spécifiquement admis la nécessité de s'orienter vers une production, une distribution et une consommation durables de l'énergie. Lorsqu'elle a établi le programme de travail pluriannuel de la CDD, la Session extraordinaire a décidé que le thème de la 9^{ème} session de la CDD, en avril 2001 (CSD-9), serait le rapport atmosphère/énergie. La 9^{ème} session traitera également de l'énergie et des transports.

Plus récemment, dans le cadre de son évaluation de la situation

ÉNERGIE ET ACTION 21

L'importance de l'énergie pour le développement durable est pleinement reconnue dans le programme Action 21. À ce propos, le chapitre 9 précise :

"L'énergie est indispensable au développement économique et social et à l'amélioration de la qualité de la vie. Une grande partie de l'énergie mondiale, cependant, est actuellement produite et consommée d'une manière qui ne pourrait être maintenue si les techniques devaient rester inchangées et les quantités globales augmenter considérablement. La réduction nécessaire des émissions de gaz à effet de serre et d'autres gaz et substances dans l'atmosphère devra s'appuyer de plus en plus sur la rationalisation de la production, de la transmission, de la distribution et de la consommation d'énergie, et sur un recours croissant à des systèmes énergétiques respectueux de l'environnement, en particulier des sources d'énergie nouvelles et renouvelables. Toutes les sources d'énergie devront être utilisées d'une façon qui respecte l'atmosphère, la santé humaine et l'environnement dans son ensemble".

L'énergie – et l'élaboration d'indicateurs de développement durable – figurent parmi 36 questions recensées dans le programme Action 21. Les thèmes abordés par Action 21 sont les suivants : agriculture; atmosphère; biodiversité; biotechnologie; développement des moyens; modes de consommation et de production; démographie; désertification et sécheresse; éducation et sensibilisation; énergie; finance; forêts; eau douce; santé; établissements humains; indicateurs; industrie; information; prise de décisions intégrée; droit international; mécanismes institutionnels; gestion des sols; principaux groupes; montagnes; océans et mers; pauvreté; sciences; petites îles; tourisme durable; technologie; substances chimiques toxiques; commerce et environnement; transports; déchets (dangereux); déchets (radioactifs); et déchets (solides).

mondiale, le Conseil mondial de l'énergie a préconisé des mesures visant à améliorer l'accessibilité, la disponibilité et l'acceptabilité de l'énergie (*voir article, page 2*).

ÉLABORATION D'INDICATEURS

Indicateurs de développement durable. Bien que les objectifs du développement durable soient très vastes, il faut, si l'on veut mesurer et surveiller les changements et les progrès conduisant à la réalisation de ces objectifs, disposer d'un ensemble de paramètres quantifiables (indicateurs). C'est pourquoi, depuis la publication du rapport Brundtland, plusieurs organisations internationales et nationales se sont employées à élaborer des indicateurs applicables à un ou plusieurs

aspects du développement durable.

Un travail novateur a été mené, à cet égard, par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Ces dix dernières années, l'OCDE a mis au point plusieurs ensembles d'indicateurs environnementaux, y compris des indicateurs relatifs aux transports, à l'énergie et à l'agriculture, ainsi qu'un ensemble d'indicateurs tirés de la comptabilité environnementale. À partir de ces travaux, l'Organisation a défini un ensemble de base d'environ 50 indicateurs environnementaux.

Une autre initiative de l'OCDE a été l'élaboration d'un cadre conceptuel appelé relation "pression-état-réaction" (PER), qui sert à catégoriser la nature de différents indicateurs environnementaux.

Dans ce modèle, qui repose sur des liens de causalité, les indicateurs de pression décrivent des pressions directes et indirectes que les activités humaines exercent sur l'environnement, y compris les ressources naturelles; les indicateurs d'état décrivent la qualité de l'environnement ainsi que la qualité et la quantité de ressources naturelles; et les indicateurs de réaction décrivent la mesure dans laquelle la société réagit aux problèmes

environnementaux par une action individuelle et collective visant à :

- 1) atténuer, adapter ou prévenir des dommages causés par l'homme à l'environnement;

- 2) interrompre ou inverser des dommages déjà infligés par l'homme à l'environnement; et
- 3) protéger et préserver la nature et les ressources naturelles.

L'élaboration d'indicateurs a été fortement stimulée par l'adoption du programme Action 21. Le chapitre 40 de ce programme prie précisément les pays et les organisations gouvernementales et non gouvernementales internationales de mettre au point le concept d'indicateurs du développement durable (IDD). En 1995, la CDD a institué, pour aider les responsables nationaux, un programme quinquennal d'élaboration d'indicateurs du développement durable. Il a été décidé qu'outre les aspects liés à l'environnement, les IDD devraient également couvrir les aspects sociaux, économiques et institutionnels, qui représentent chacun une dimension essentielle distincte du développement durable. En collaboration avec un grand nombre de gouvernements et d'organisations, la CDD a élaboré, en 1996, une liste de travail préliminaire de 134 IDD recouvrant les différents chapitres du programme Action 21.

Les responsables du programme d'élaboration d'indicateurs ne considèrent pas la liste de travail

de la CDD comme formant un ensemble complet. Ils prévoient seulement de l'utiliser, après y avoir apporté les améliorations nécessaires, comme un ensemble de base auquel d'autres indicateurs, ou ensembles d'indicateurs couvrant certains aspects du développement durable, pourront s'ajouter. La liste est actuellement soumise à des essais volontaires dans 22 pays de différentes parties du monde. La CDD compte disposer, d'ici à 2001, d'un ensemble convenu d'indicateurs de base utilisables par tous les pays.

Pour expliciter la nature des différents indicateurs, la CDD a adopté le cadre conceptuel de l'OCDE et l'a développé en remplaçant le concept de "pression" par celui de "force agissante". Dans ce cadre "force agissante-état-réaction", les indicateurs de force agissante englobent les activités, procédures et structures humaines qui influent positivement et négativement sur le développement durable; les indicateurs d'état décrivent la situation du développement durable; et les indicateurs de réaction mettent en lumière les décisions politiques et autres mesures prises face aux changements survenant dans la situation du développement durable.

Plus tard, en 1998, la Division du développement durable du Département des affaires économiques et sociales de l'Organisation des Nations Unies a établi un ensemble de 43 indicateurs clés et un ensemble de base provisoire de 17 indicateurs destinés à mesurer l'évolution des modes de consommation et de production. Ces indicateurs recouvraient toutes les "ressources clés" – énergie, matières premières, eau et terres – et "catégories de consommation" – mobilité, biens de consommation et services,

bâtiment et économie domestique, alimentation et loisirs.

Une fois testés par les gouvernements et par les organisations internationales, les indicateurs d'évolution devraient être inclus dans la liste d'indicateurs révisée de la CDD.

Entre autres activités apparentées, les travaux d'élaboration d'indicateurs environnementaux menés actuellement par l'Office statistique de l'Union européenne (EUROSTAT) et par l'Agence européenne de l'environnement (AEE) méritent une mention particulière. Ces organisations ont également adapté et développé le cadre de l'OCDE pour créer un nouveau modèle appelé "force agissante-pression-état-impact-réaction". Les indicateurs de force agissante, de pression et de réaction sont mis au point par EUROSTAT, tandis que ceux d'état et d'impact sont pris en charge par l'AEE. Récemment, EUROSTAT a produit un ensemble de 60 indicateurs de pression comprenant six indicateurs pour chacun des dix thèmes principaux (pollution de l'air; changement climatique; perte de la biodiversité; milieu marin et zones littorales; appauvrissement de la couche d'ozone; épuisement des ressources; dispersion de substances toxiques; problèmes liés au milieu urbain; déchets; pollution de l'eau et ressources en eau) recensés dans le Cinquième plan d'action pour l'environnement de l'Union européenne. Il envisage également d'examiner la possibilité d'agréger ces 60 indicateurs en 10 indices, soit un par domaine d'action, ce qui faciliterait la comparaison avec des indices économiques tels que le produit intérieur brut. Le modèle "force agissante-pression-état-impact-réaction" a été adopté par la plupart des États Membres de l'Union européenne, qui

estiment que c'est là la meilleure façon de structurer l'information environnementale.

Des indicateurs de développement durable adaptés à certaines situations nationales sont ou ont été mis au point par plusieurs pays tels que le Royaume-Uni, les États-Unis, le Canada, la France, les Pays-Bas et les pays nordiques. De façon générale, toutes ces activités utilisent les modèles "pression-état-réaction" et "force agissante-pression-état-impact-réaction" pour définir et classer divers indicateurs appropriés.

D'autres organisations telles que la Banque mondiale et le Comité scientifique d'étude des problèmes environnementaux établi par le Conseil international des unions scientifiques s'emploient également à mettre au point des indicateurs agrégés ou un petit nombre d'indices de développement durable en définissant et en évaluant les liens qui existent entre les différents éléments sociaux, économiques, environnementaux et institutionnels dudit développement. Elles utilisent des formules mathématiques plus ou moins complexes pour combiner plusieurs indicateurs en un indice unique en affectant un coefficient de pondération approprié à chaque indicateur en fonction de son importance relative.

On peut citer, comme indicateurs de ce type, l'indicateur d'"épargne réelle" (défini comme le taux d'épargne réel d'un pays compte dûment tenu de l'épuisement des ressources naturelles et des dommages causés par la pollution) et l'indicateur de "richesse nationale" (indice agrégé représentant le stock de biens produits, le capital naturel et les ressources humaines, ces dernières comprenant la main-d'œuvre brute, le capital humain et le capital social).

Cette méthode d'agrégation, qui peut être très utile pour réduire le nombre d'indicateurs, présente néanmoins de graves inconvénients, les pondérations utilisées pour agréger différents indicateurs reflétant des préférences subjectives, ce qui pose un problème politique. Elle peut, par conséquent, parfois donner des résultats sans signification réelle.

INDICATEURS DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE DURABLE

À ce jour, peu d'activités ont été menées pour mettre au point des indicateurs du développement énergétique durable (IDED). Plusieurs indicateurs relatifs à l'énergie apparaissent néanmoins dans les activités de diverses organisations internationales et nationales. Parmi ces organisations, c'est dans les travaux de l'OCDE consacrés aux indicateurs environnementaux et notamment aux indicateurs sectoriels relatifs à l'énergie et à l'environnement qu'on trouve la couverture de loin la plus détaillée d'indicateurs relatifs à l'énergie. Ces indicateurs ont été mis au point pour faciliter l'intégration des questions environnementales dans l'élaboration de la politique énergétique des pays de l'OCDE. Ils reposent sur un modèle "pression-état-réaction" ajusté et ont été classés en trois thèmes : i) tendances du secteur énergétique ayant une incidence sur l'environnement, ii) leur interaction avec l'environnement et les ressources naturelles, et iii) considérations économiques et politiques connexes.

Dans le cadre de travaux distincts, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE a mis au point quelques indicateurs relatifs à la consommation d'énergie et au rendement énergétique dans différents

secteurs de l'économie et les a liés aux émissions de carbone en utilisant un modèle dit Modèle d'indicateurs "consommation d'énergie/émissions". Par ailleurs, la liste de travail du programme d'élaboration d'indicateurs du développement durable, qui n'aborde pas explicitement les questions d'énergie, comprend aussi, cependant, plusieurs indicateurs relatifs à l'énergie qui ont été définis en rapport avec certains chapitres du programme Action 21.

Certains indicateurs spécifiques au secteur énergétique ont été définis par la Division du développement durable dans le cadre de ses activités consacrées à l'évolution des modes de production et de consommation (chapitre 4 d'Action 21). Différents indicateurs énergétiques traitant généralement de questions liées à l'environnement apparaissent également dans les travaux d'EUROSTAT, de l'AEE et dans divers projets nationaux.

Un ensemble de sept indicateurs couvrant les problèmes environnementaux liés à la gestion des déchets radioactifs (chapitre 22 d'Action 21) a également été mis au point par l'AIEA. En outre, l'AIEA élabore des ensembles complets et élémentaires d'IDED en coopération avec ses États Membres et avec des organisations internationales (*voir encadré page 18*).

À ce jour, donc, la plupart des activités d'élaboration d'indicateurs concernent uniquement la dimension environnementale de la durabilité, et encore cette dimension est-elle fragmentée. Il continue de manquer un traitement global du secteur énergétique englobant les quatre dimensions de la durabilité.

On prend de plus en plus conscience de la nécessité d'élaborer un ensemble complet d'indicateurs du développement énergétique durable. Cette

INDICATEURS DU DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE DURABLE : L'ACTION DE L'AIEA

Un projet d'élaboration d'indicateurs du développement énergétique durable (IDED) a été lancé par l'AIEA dans le cadre de son programme de travail sur l'évaluation comparative des sources d'énergie pour la période biennale 1999-2000. Ce projet est mis en œuvre par la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire. Il a notamment pour tâches : 1) de définir les principaux éléments du développement énergétique durable et d'élaborer un ensemble cohérent d'indicateurs appropriés en gardant à l'esprit les indicateurs du programme Action 21, 2) d'établir des liens entre les IDED et les indicateurs d'Action 21, et 3) de réexaminer les bases de données et les outils de l'Agence pour déterminer les modifications à apporter en vue de l'application des IDED.

Les deux premières tâches sont menées avec l'aide d'experts provenant de différentes organisations internationales et d'États Membres. À cet égard, il a été organisé deux réunions de groupes d'experts, l'une en mai 1999 et l'autre en novembre de la même année. Il a été décidé que les questions clés qu'il fallait aborder, s'agissant du développement énergétique durable, étaient les suivantes : développement social; développement économique; agrément de l'environnement et gestion des déchets; épuisement des ressources; offre adéquate d'énergie et disparités; rendement énergétique; sécurité énergétique; solutions d'approvisionnement énergétique; et prix de l'énergie.

Dans un premier temps, il a été établi, pour couvrir ces questions clés, une liste préliminaire d'une centaine d'IDED. Il a été élaboré, en tirant parti des travaux réalisés par d'autres organisations dans le domaine de l'environnement, un nouveau modèle de cadre conceptuel spécifiquement adapté au secteur énergétique. Ce modèle repose sur la méthode "cause, symptôme et solution" et englobe les quatre dimensions – sociale, économique, environnementale et institutionnelle – du développement durable.

Pour chaque dimension de la durabilité, le modèle aide à organiser les indicateurs définis de façon à montrer les liens qui existent entre eux en les classant comme indicateurs de force agissante, d'état ou de réaction. Les indicateurs définis pour la dimension

institutionnelle sont classés uniquement comme mesures correctives ou réactions, en fonction des indicateurs d'état des trois autres dimensions de la durabilité.

Dans le cadre de ce modèle conceptuel, il a été établi deux listes provisoires d'IDED – une liste complète et une liste élémentaire. Ces listes comprennent des indicateurs applicables aux questions énergétiques principales et secondaires suivantes ressortant des dimensions économique, sociale et environnementale du développement énergétique durable :

Dimension économique : niveaux d'activité économique; intensité énergétique finale de certains secteurs et de différentes industries manufacturières; rendement de l'approvisionnement en énergie; sécurité énergétique; et prix de l'énergie.

Dimension sociale : accessibilité de l'énergie et disparités.

Dimension environnementale : pollution de l'air (qualité de l'air urbain; changement climatique mondial); pollution de l'eau; déchets; utilisation des sols; risques d'accident; épuisement des ressources énergétiques; et déforestation.

L'ensemble complet provisoire comprend 28 indicateurs de force agissante, 13 indicateurs d'état et 29 indicateurs de réaction. La liste élémentaire provisoire d'IDED a été présentée à l'Atelier international sur les indicateurs de développement durable de la CDD, tenu à la Barbade en décembre 1999.

Alors que les activités visant à améliorer les listes provisoires – complète et élémentaire – d'IDED se poursuivront quelque temps encore, il est prévu de les tester sur une échelle limitée dans les pays. Il est prévu, pour cela, de s'adjoindre l'aide des équipes qui participent, en collaboration avec l'AIEA, à la formulation des stratégies nationales de développement énergétique durable. On espère que ces activités aideront l'Agence, d'une part, à contribuer utilement aux travaux de la CDD consacrés aux questions énergétiques et, d'autre part, à modifier ses propres bases de données et outils méthodologiques pour mieux intégrer les questions liées au développement énergétique durable.

nécessité s'est exprimée dans le programme de travail adopté à la session extraordinaire de 1997 de l'Assemblée générale des Nations Unies et dans la décision prise de faire des questions énergétiques l'un des principaux thèmes de la

9^{ème} session de la CDD en avril 2001.

Il s'agit là d'une évolution heureuse. Grâce à ses activités, l'AIEA joue un rôle de premier plan dans l'action menée au plan

international pour mettre au point des ensembles utiles d'indicateurs qui aideront les gouvernements à suivre et à évaluer les progrès accomplis sur la voie difficile du développement énergétique durable. □

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE PROVENANT DES CHAÎNES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ÉVALUER LA DIFFÉRENCE

JOSEPH V. SPADARO, LUCILLE LANGLOIS ET BRUCE HAMILTON

Au cours de la décennie écoulée, on s'est de plus en plus interrogé, dans le monde, sur l'impact qu'ont les activités humaines sur le système climatique mondial du fait des émissions de gaz à effet de serre. À ce jour, les discussions ont essentiellement porté sur les rejets – d'origine humaine – de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4), d'hémioxyde d'azote (N_2O) et de composés halogénés contenant du fluor, du chlore et du brome. Les concentrations atmosphériques de ces gaz ont considérablement augmenté depuis la période préindustrielle, faisant plus que doubler, en fait, dans le cas du méthane.

Afin de stabiliser les concentrations atmosphériques à un niveau qui réduirait le risque de changement climatique mondial important, plus de 130 pays ont ratifié, lors du Sommet de la Terre organisé en 1992 au Brésil, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Suite à cette première mesure, il a été organisé à Kyoto, en décembre 1997, la 3^{ème} réunion de la Conférence des parties, où les décideurs ont fixé, pays par pays, des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Actuellement, les pays industrialisés – ou pays de l'Annexe I – sont responsables d'une grande partie des rejets de gaz à effet de serre dans le monde. Près des deux tiers des émissions de gaz à effet de serre peuvent être imputés à des activités associées à la production d'électricité et au secteur des transports. Le respect

du Protocole de Kyoto par les pays de l'Annexe I exigera par conséquent une solide volonté de développer et d'exploiter des sources d'énergie émettant peu de carbone. L'amélioration des techniques de conversion du combustible en énergie jouera également un rôle important lorsque ces pays devront satisfaire la future demande d'énergie. Les pays en développement n'étant pas, quant à eux, liés par le Protocole de Kyoto et leur consommation d'énergie augmentant, le taux d'émission de gaz à effet de serre y croît très rapidement et leur part devrait dominer les rejets mondiaux à la fin du premier quart du XXI^e siècle.

Étant donné que la production d'électricité est l'une des principales sources d'émission de gaz à effet de serre (elle représente maintenant un tiers des émissions mondiales), l'AIEA a entrepris – dans le cadre de son Programme d'évaluation comparative des sources d'énergie – d'étudier les émissions de gaz à effet de serre provenant de toutes les activités (chaînes) de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables. L'AIEA a donc organisé, d'octobre 1994 à juin 1998, six réunions de groupes consultatifs consacrées aux chaînes de combustible suivantes : lignite, charbon, pétrole, gaz, nucléaire, biomasse, hydroélectricité, et énergie éolienne et solaire. Ces réunions ont produit deux types de résultat. Premièrement, les participants ont mis au point,

pour l'ensemble de la chaîne énergétique liée à la production d'électricité, un ensemble cohérent de coefficients d'émission de gaz à effet de serre. Deuxièmement, ils ont mis en avant, s'agissant des combustibles et des technologies, des solutions qui pourraient être exploitées pour faciliter le respect des engagements contractés au titre de la Convention-cadre des Nations Unies. Le présent article énumère et commente les résultats et les principales conclusions de ces réunions.

COEFFICIENTS D'ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les coefficients d'émission de gaz à effet de serre ont été analysés pour différents types de combustible dans le cadre de divers études. Les résultats sont exprimés en grammes d'équivalent carbone (y compris le CO_2 , le CH_4 , le N_2O , etc.) par kilowatt/heure d'électricité (gCeq/kWh). Le graphique de la page 21 présente des données provenant de centrales électriques existantes (technologie des années 90) et des coefficients d'émission correspondant à des systèmes qui devraient être opérationnels à court ou moyen terme (technologies des années 2005-2020).

Les auteurs travaillent à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA. Les références complètes du présent article sont disponibles auprès de ces personnes.

GAZ À EFFET DE SERRE ET DÉVELOPPEMENT ÉNERGÉTIQUE

Une série de fiches publiées par le secrétariat de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques montrent comment les activités humaines produisent des gaz à effet de serre. Les principales réalités énoncées sont les suivantes :

■ La plupart des activités humaines émettent des gaz à effet de serre, et nombre de ces activités sont désormais indispensables à l'économie mondiale.

■ Le dioxyde de carbone découlant de l'utilisation de combustibles fossiles est la principale source de gaz à effet de serre provenant d'activités humaines. L'offre et la consommation de combustibles fossiles représentent en effet près des trois quarts des émissions de dioxyde de carbone provenant d'activités humaines.

■ La plupart des émissions liées à la consommation d'énergie se produisent lors de la combustion de combustibles fossiles. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon fournissent l'essentiel de l'énergie utilisée pour produire de l'électricité, chauffer les logements et faire fonctionner les automobiles et les usines. Si le combustible brûlait complètement, le seul sous-produit contenant du carbone serait le dioxyde de carbone. Mais la combustion, souvent incomplète, produit également du monoxyde de carbone et d'autres hydrocarbures. La combustion produit de l'hémioxyde d'azote et d'autres oxydes d'azote parce qu'elle combine l'azote présent dans le combustible ou dans l'air à l'oxygène présent dans l'air.

■ L'extraction, le traitement, le transport et la distribution de combustibles fossiles entraînent également des émissions de gaz à effet de serre.

Pour de plus amples renseignements, consulter le dossier d'information de la Convention-cadre sur les changements climatiques à l'adresse Internet www.unfccc.de.

Les estimations reflètent les différences de méthode d'évaluation, de rendement de conversion, de méthode de préparation du combustible et de transport subséquent vers la centrale électrique, ainsi que des réalités locales tels que le panachage de combustibles jugé nécessaire pour répondre aux besoins en électricité liés à la construction des centrales et à la fabrication des équipements. Les taux futurs tiennent compte des améliorations apportées au processus de conversion du combustible en énergie, des réductions opérées pendant l'extraction et le transport du combustible, et de la réduction des émissions opérée pendant la construction des centrales et des équipements.

Pour ce qui est des combustibles fossiles, le taux d'émission total correspond à la somme des émissions de cheminées produites pendant la combustion et des rejets provenant des activités ou chaînes d'amont et d'aval. Généralement, les émissions de gaz à effet de serre

provenant de la construction et du déclassement de centrales et celles provenant des lignes électriques reliant la centrale au réseau sont négligeables. Par exemple, 1% seulement des émissions totales de gaz à effet de serre peuvent être attribuées à la construction et au déclassement de centrales.

S'agissant de l'hydroélectricité, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, la taille et le type de la centrale sont, dans l'analyse, déterminants. Des considérations telles que l'implantation géographique et les règles locales de construction influencent fortement le taux d'émission. L'impact de ces facteurs sur le taux d'émission de gaz à effet de serre apparaît dans le graphique.

Les réunions de groupes consultatifs organisées par l'AIEA ont toutes montré que les technologies à base de combustibles fossiles ont des coefficients d'émission plus élevés, celui du gaz naturel atteignant près de la moitié de celui du charbon et du lignite, et environ deux tiers du coefficient estimatif

du fioul. L'énergie nucléaire et l'hydroélectricité, en revanche, ont des coefficients d'émission plus faibles, de 50 à 100 fois inférieurs à ceux du charbon (en fonction de la technologie). Les coefficients d'émission liés à l'énergie solaire se situent entre les deux et sont légèrement supérieurs à ceux liés au nucléaire.

MÉTHODE D'ANALYSE

Dans une analyse du cycle de vie, le but est de déterminer les contraintes environnementales liées à la création d'un produit en tenant compte, à chaque étape de la procédure, du débit massique et des flux énergétiques. Dans le cas de la production d'électricité, le produit final est 1 kWh d'énergie.

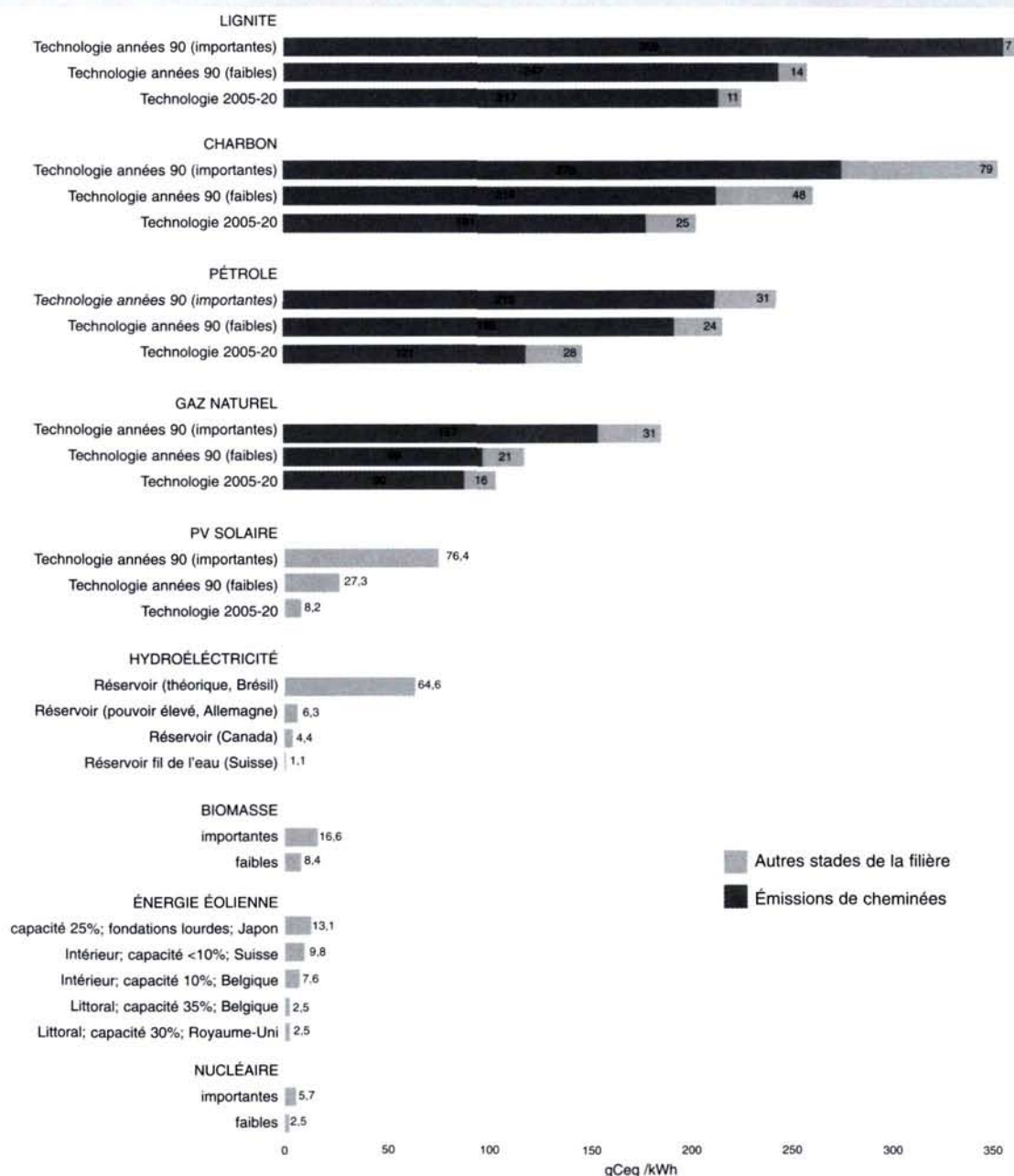
Parfois, une analyse du cycle de vie – ou analyse de filière – se complète d'une analyse intrants-extrants. Une telle analyse prend en compte les émissions indirectes imputables à différents secteurs économiques contribuant à la création du produit final, comme par exemple l'électricité utilisée dans la fabrication, la conception de machines et la main-d'œuvre.

Si l'on néglige ces intrants, on risque de sous-estimer les conséquences écologiques en réduisant artificiellement le champ de l'analyse. Par exemple, lorsque l'on compare les coefficients d'émission des combustibles fossiles en tenant compte des intrants et des extrants, on obtient un résultat supérieur de 30% à celui obtenu par l'analyse de filière. Dans le cas de l'énergie nucléaire, l'écart peut être encore plus prononcé, voire atteindre le double.

CHAMP D'ANALYSE

Lorsque l'on compare différents systèmes énergétiques, le choix du champ d'analyse revêt une grande importance. Par exemple, si l'on ignore, pour les cycles du combustible fossile, les activités d'amont et d'aval, on risque de sous-estimer de 5 à 25% le taux

ÉMISSIONS TOTALES DE GAZ À EFFET DE SERRE PROVENANT DES CHAÎNES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ



Source : AIEA

d'émission total de gaz à effet de serre. Pour l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, il ne se produit aucune émission de gaz à effet de serre au point de production, mais des rejets atmosphériques se produisent pendant l'extraction, la préparation et le transport du

combustible, la construction et le déclassement des centrales, la fabrication des équipements et la décomposition des matières organiques. Le niveau d'émission dépend fortement de la technologie utilisée et de l'implantation géographique de la centrale.

La façon la plus juste de comparer les contraintes climatiques et environnementales liées à différents combustibles et à différentes techniques de production d'électricité est peut-être d'effectuer un calcul portant sur la filière énergétique complète, en prenant en compte tous les

stades du cycle de vie. Au bout du compte, les moyens d'analyse et le sens commun dicteront le choix du champ d'analyse. Pour le moins, les intensités d'émission devront inclure la filière d'approvisionnement en combustible, le stade de production d'électricité et, pour le nucléaire et les énergies renouvelables, les émissions liées à la construction des centrales et à la fabrication des équipements. Une analyse plus poussée pourrait étendre son champ jusqu'au stade de la consommation finale d'énergie, c'est-à-dire jusqu'au niveau des appareils électriques.

S'agissant des techniques intermittentes telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et, dans une moindre mesure, l'hydroélectricité, la question se pose de savoir si le système analysé devrait englober ou non les sources de rechange (secondaires). Le mieux est de calculer séparément les émissions pour les systèmes primaires et secondaires. Cette méthode présente trois avantages. Premièrement, on peut déterminer strictement les émissions liées au système primaire à partir de l'utilisation d'une technique donnée. Deuxièmement, on peut déterminer clairement l'influence du rendement ou de la disponibilité annuel(le) (heures de fonctionnement par an). Troisièmement, on peut comparer différentes solutions de rechange.

INDICE DE RÉCHAUFFEMENT

L'indice de réchauffement est la mesure dans laquelle un gaz présent dans l'atmosphère peut piéger la chaleur irradiée par la surface de la Terre par rapport à un gaz de référence, généralement le dioxyde de carbone. La durée de vie atmosphérique des gaz variant fortement, les résultats sont calculés sur différents intervalles de temps. Généralement, on

choisit un horizon temporel de 100 ans.

On trouvera ci-après les estimations les plus récentes des indices de réchauffement (horizon temporel : 100 ans). Ces valeurs ont été calculées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat pour les gaz à effet de serre les plus fréquemment émis par les filières de production d'électricité :

- dioxyde de carbone (CO_2) = 1;
- méthane (CH_4) = 21;
- hémioxyde d'azote (N_2O) = 310;
- hexafluorure de soufre (SF_6) = 23900;
- tétrafluorométhane (CF_4) = 6500;
- hydrocarbures fluorés (HFC) :
HFC-134a = 1300;
- chlorofluorocarbones (CFC) :
CFC-114 = 9300;
- hydrochlorofluorocarbones (HCFC) : HCFC-22 = 1700.

RENDEMENT DE CONVERSION

Le rendement de conversion du combustible en électricité et le coefficient de charge d'une centrale influencent tous deux le taux d'émission de gaz à effet de serre lors de la combustion. Le coefficient d'émission de gaz à effet de serre diminue lorsque soit le rendement de conversion, soit le coefficient de charge augmente. Les émissions de CO_2 dépendent de la teneur en carbone du combustible et du rendement de conversion, les taux de N_2O dépendent essentiellement de considérations liées à la filière de production, tandis que les rejets de méthane dépendent principalement des méthodes d'approvisionnement en combustible fossile. Globalement, le taux d'émission est inversement proportionnel au rendement de conversion. À un rendement de conversion d'exactement 40%, une augmentation supplémentaire de 1% réduit le taux d'émission de gaz à effet de serre de 2,5%. À des rendements inférieurs, la

réduction du taux d'émission est plus prononcée, tandis qu'à des rendements supérieurs, c'est l'inverse qui se produit. Le rendement thermique diminue toujours avec le coefficient de charge, son évolution dépendant fortement de la technologie utilisée.

Les rendements de conversion typiques des systèmes d'exploitation actuels sont compris entre les valeurs suivantes : 27 à 40% pour les centrales fonctionnant au lignite, 30 à 45% pour le charbon, 34 à 43% pour le pétrole et 35 (en charge de pointe) à 55% pour le gaz naturel. Les centrales ayant des rendements inférieurs sont généralement celles implantées dans des pays en développement.

À moyen terme, le rendement de conversion des meilleures technologies disponibles devrait être de l'ordre de 50 à 55% pour le charbon et de 60 à 65% pour les centrales fonctionnant au gaz.

Dans le domaine du nucléaire et des énergies renouvelables, la réduction des émissions liée à l'amélioration des rendements de conversion aura un impact plus faible, car il n'y a pas d'émissions de cheminées; la plupart des rejets proviennent davantage de l'approvisionnement en combustible, de la construction des centrales et de la fabrication des équipements. En fait, les besoins en combustible et les émissions totales vont diminuer à mesure que de nouvelles technologies permettront d'améliorer les rendements.

FUTURS SYSTÈMES DE PRODUCTION

Des techniques nouvelles et plus rationnelles vont inévitablement supplanter les systèmes actuels, même si à court et moyen termes (10 à 20 prochaines années), on ne prévoit pas, dans les pays industrialisés, d'évolution radicale des techniques de production

FACTEURS INFLUANT SUR LES TAUX D'ÉMISSION

Le taux d'émission de gaz à effet de serre est influencé par plusieurs facteurs. Les paramètres dominants pour chaque type de combustible sont résumés ci-après.

Combustibles fossiles

- Caractéristiques du combustible (teneur en carbone, pouvoir calorifique, etc.);
- Type de mine et emplacement;
- Méthodes d'extraction du combustible (conditions de transport, rejets de méthane);
- Pertes de transport pour le gaz naturel;
- Rendement de conversion;
- Panachage de combustibles pour répondre aux besoins en électricité liés à l'approvisionnement et à la construction/au déclassement des centrales.

Hydroélectricité

- Type (fil de l'eau ou réservoir);
- Emplacement de la centrale (climat tropical/septentrional);
- Énergie consommée pour la construction du barrage;
- Émissions dues à la construction de la centrale (béton et acier), qui dominent pour les centrales au fil de l'eau et les réservoirs de type alpin (montagneux). Pour les grands réservoirs (généralement situés dans des régions septentrionales telles que le Canada et la Finlande) dont le rapport surface/volume est important et dans les régions tropicales humides (Brésil), le taux d'émission de gaz à effet de serre est influencé par la décomposition de la biomasse immergée et par l'oxydation des sédiments de surface (responsables d'importantes émissions de CH_4). Les émissions de CO_2 pour les réservoirs de type "septentrional" sont au moins dix fois supérieures aux taux de CH_4 .

Biomasse

- Propriétés de la matière première (humidité et pouvoir calorifique);
 - Énergie consommée pour obtenir la matière première (culture, récolte et transport);
 - Technologie utilisée par la centrale.
- Le coefficient d'émission de dioxyde de carbone, pour la combustion de biomasse, est neutre, ce qui revient à dire que le carbone rejeté pendant la combustion de la biomasse équivaut à l'absorption biotique qui a lieu pendant la culture des plantes.

Énergie nucléaire (réacteur à eau ordinaire)

- Énergie consommée pour l'extraction, la conversion, l'enrichissement et la construction/le déclassement (plus équipements);
- Enrichissement du combustible par diffusion gazeuse, processus à forte intensité énergétique qui peut accroître, dans une certaine mesure, les rejets de gaz à effet de serre par rapport à un enrichissement par centrifugeuse;
- Émissions provenant de la phase d'enrichissement, fortement fonction du pays car dépendantes du panachage local de combustibles;
- Retraitement du combustible (oxyde d'uranium ou oxyde mixte), qui peut représenter 10 à 15% des émissions totales de gaz à effet de serre liées au nucléaire.

Énergie éolienne

- Énergie consommée pour fabriquer les pales et construire l'installation (tour et fondations);
- Parts des différentes sources d'électricité et règles de construction, fortement fonction du pays et du site (implantation intérieure ou côtière, par exemple);
- Rendement annuel ou coefficient d'utilisation (dépend du choix du site naturel), qui définit la fréquence d'exploitation (disponibilité) de l'installation. La vitesse moyenne du vent est le paramètre essentiel lorsqu'on évalue le degré d'intermittence de la production (une augmentation de 50% de la vitesse du vent double globalement le rendement annuel).

Photovoltaïque (PV) solaire

- Quantité et qualité du silicium utilisé pour la fabrication des cellules;
- Type de technologie (matériau amorphe ou cristallin);
- Type d'installation (toit ou façade);
- Panachage des combustibles pour répondre aux besoins en électricité;
- Rendement annuel et durée de vie présumée de l'installation, considérations importantes lors du calcul des émissions par kWh (cela vaut également pour l'énergie éolienne). Les énergies solaire et éolienne ont des coefficients d'émission relativement faibles par kWh, mais élevés par kWh en raison de coefficients d'utilisation plus faibles (technologies intermittentes).

d'électricité étant donné les sommes importantes déjà investies dans les technologies et l'infrastructure énergétiques. L'apparition de nouveaux systèmes énergétiques ne va pas autant de soi

dans les pays en développement, qui font face à de difficiles choix économiques, sociaux, politiques et environnementaux.

La volonté d'atténuer les conséquences de la pollution et

différents facteurs économiques et politiques inciteront à promouvoir et à utiliser des technologies améliorées et à développer l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que la

biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

Pour les systèmes utilisant des combustibles fossiles, les changements les plus importants viendront des améliorations apportées au rendement de conversion des technologies existantes (cycles combinés, par exemple), de la réduction du taux de perte de méthane lors du transport du gaz naturel, de l'amélioration de la récupération assistée du méthane pendant l'extraction du combustible, de la maîtrise des propriétés chimiques des combustibles (par exemple en lavant le charbon pour améliorer son pouvoir calorifique), et de l'optimisation de l'implantation des centrales électriques pour réduire les émissions et les pertes dues au transport. En Europe, des experts ont estimé que les émissions provenant des futurs systèmes à combustibles fossiles pourraient être de 35 à 50% inférieures aux taux actuels.

Pour ce qui est de l'énergie nucléaire, les importants changements prendront la forme d'un enrichissement du combustible par centrifugeuse (ou laser) plutôt que par la méthode, à forte intensité énergétique, de la diffusion gazeuse; d'une amélioration du rendement de conversion; d'un développement du recours au retraitement du combustible; et des futurs progrès des techniques nucléaires de production d'électricité (*voir articles pages 43 et 51*).

L'amélioration de la technologie des turbines permettra de réduire les émissions provenant de l'hydroélectricité, tandis que sur les systèmes intermittents, la réduction des besoins en équipements et en composants et l'amélioration du rendement de conversion amélioreront les performances, ce qui permettra également de réduire les coûts et les émissions. L'implantation géographique des centrales

hydroélectriques ainsi que le type d'installation conserveront toute leur importance.

CONCLUSIONS

Les gaz à effet de serre peuvent influencer sur les changements climatiques mondiaux en interférant avec le processus naturel d'échange de chaleur qui se produit entre l'atmosphère terrestre et l'espace extra-atmosphérique. La réduction des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre est devenue une priorité internationale, comme en témoigne la signature du Protocole de Kyoto, qui réduirait les émissions provenant des pays industrialisés (Annexe I) d'environ 5% par rapport aux niveaux de 1990 pendant la période d'engagement (2008-2012).

Plusieurs solutions techniques pourraient être mises en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction proposés. Pour ce qui est des émissions liées à la production d'électricité, le facteur le plus important à court terme est peut-être l'amélioration du rendement énergétique à tous les stades du cycle du combustible, y compris la préparation et le transport du combustible, et la conversion du combustible en électricité au niveau tant de la centrale que de l'utilisation finale (ce qui n'a pas été envisagé ici).

Les stratégies visant à réduire les rejets de méthane pendant l'extraction du combustible et le transport du gaz présentent un grand intérêt. Le passage à des combustibles émettant moins de produits carbonés ou à des combustibles à faible teneur en carbone tels que le gaz, le nucléaire et les énergies renouvelables contribuera de façon importante à réduire les émissions. Ces changements, techniquement réalisables en mettant à profit les connaissances et l'expérience actuelles, ne nécessitent qu'une adaptation

minimale du mode de vie des consommateurs et représentent un roulement raisonnable du capital (gaz et nucléaire pour la production de la charge de base et énergies renouvelables sur des marchés étroits ou en charge de pointe).

Le présent article a présenté les coefficients d'émission de gaz à effet de serre relatifs à différents combustibles en prenant en compte la filière énergétique complète, c'est-à-dire en tentant de quantifier les émissions provenant de tous les stades de la production d'électricité. Les techniques faisant appel à des combustibles fossiles présentent les coefficients d'émission les plus élevés, le charbon ayant un coefficient deux fois plus élevé que le gaz naturel.

Compte tenu des importantes différences qui existent sur le plan des techniques de conversion du combustible en électricité, on peut dire que les coefficients d'émissions de gaz à effet de serre peuvent être légèrement supérieurs à ceux des systèmes photovoltaïques solaires actuels et jusqu'à deux fois supérieurs à ceux du nucléaire et de l'hydro-électricité. Les estimations concernant l'énergie éolienne et les filières utilisant la biomasse se situent entre les valeurs du solaire et du nucléaire.

Il est une importante conclusion qu'on ne saurait trop souligner : aucune technologie utilisée pour la fourniture et la consommation d'énergie – qu'il s'agisse de production ou de transport d'électricité, etc. – n'émet aucun gaz à effet de serre. Les écarts de coefficient d'émission entre les différentes solutions peuvent, cependant, être considérables. Ce fait influera certainement sur la prise de décisions concernant le choix des centrales électriques qui formeront les futurs systèmes énergétiques nationaux. □

LES MÉCANISMES FLEXIBLES DE KYOTO ET L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE REPENSER LES CHOIX

HANS-HOLGER ROGNER

La réduction des émissions de gaz à effet de serre est l'un des principaux buts du Protocole de Kyoto, que les pays ont adopté en décembre 1997. Ces réductions, cependant, ne seront pas faciles à opérer – des réductions de l'ampleur préconisée dans le Protocole nécessiteraient une restructuration substantielle de la production et de la consommation d'énergie dans la plupart des pays industrialisés. Aux termes du Protocole, ces pays (appelés Parties visées à l'Annexe I) font en sorte, individuellement ou conjointement, que leurs émissions anthropiques agrégées, exprimées en équivalent-dioxyde de carbone, de gaz à effet de serre ... ne dépassent pas les quantités qui leur sont attribuées ... en vue de réduire le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5,2% par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012 (voir encadré page 27).

Depuis la signature, en 1992, de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, les gouvernements se sont efforcés de définir des politiques capables de simultanément satisfaire les exigences des responsables nationaux et répondre aux besoins en matière de gestion mondiale de l'environnement. La production d'électricité devrait devenir l'une des principales cibles de l'action politique. D'une part, parce que la production d'électricité représente environ un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone. D'autre part, parce que ce secteur compte un nombre relativement limité d'acteurs et de sources

d'émission, qui sont plus faciles à réguler et à maîtriser que, disons, des millions de pots d'échappement de véhicules.

Les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) fournissent près de 63% de l'électricité mondiale, ces pourcentages étant, dans les pays en développement ayant une consommation importante d'électricité, nettement supérieurs – plus de 80% en Chine et en Inde. En 1998, les émissions de carbone (C) provenant de l'utilisation de combustibles fossiles ont atteint presque 6,5 gigatonnes (Gt). Même si, historiquement, l'essentiel de ces émissions provenaient des pays industrialisés, les émissions de carbone provenant des pays en développement ont augmenté rapidement – de 32% entre 1990 et 1998.

Dans une grande mesure, cette augmentation est due à la croissance rapide d'un secteur de l'offre d'électricité qui, à l'avenir, devrait dépasser la croissance des pays visés à l'Annexe I. Les projections de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) montrent qu'environ 770 GW des 1380 GW d'addition nette de capacité escomptés au niveau mondial entre 2000 et 2020 seront produits dans des pays en développement. En termes de panache des combustibles, plus de 75% seront produits à l'aide de combustibles fossiles (charbon : 348 GW; gaz naturel : 210 GW; dérivés du pétrole : 49 GW; nucléaire : 30 GW; hydroélectricité : 124 GW; et énergies renouvelables : 9 GW). Ce sont ces projections de

croissance rapide des émissions de gaz à effet de serre dans les pays en développement (pays non visés à l'Annexe I) qui ont incité plusieurs pays visés à l'Annexe I à solliciter une "participation significative des pays en développement".

De surcroît, l'expérience a montré que le fait d'autoriser des agents économiques à échanger – dans le cas présent des unités de réduction des émissions (URE) nationales ou droits d'émission – peut réduire considérablement les coûts encourus pour atteindre un objectif de réduction des émissions agrégées. Le Protocole prévoit, à l'article 17, un tel échange mais indique clairement que tout échange de ce type vient en complément des mesures prises au niveau national. L'échange des droits d'émission signifie que si une Partie souhaite émettre davantage que la quantité attribuée, elle doit acheter à d'autres Parties la quantité correspondante de droits d'émission, forçant par là même les Parties vendeuses à réduire leurs émissions au-delà des objectifs fixés. Compte tenu de la clause de complémentarité, les Parties ne peuvent acheter qu'une partie de leurs réductions d'émission tandis que les quantités maximales n'ont toujours pas été spécifiées. Bien entendu, l'échange de droits d'émission est réservé aux Parties qui sont soumises à une limitation de leurs émissions.

Si l'échange de droits d'émission introduit une certaine souplesse

M. Rogner dirige la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA.

dans le respect des engagements de réduction d'émissions, il n'institue pas, pour autant, une "participation significative des pays en développement". En outre, les pays non visés à l'Annexe I sont résolument opposés à l'idée même de prendre des mesures coûteuses de réduction des émissions qui détourneraient d'autres projets de développement vitaux des ressources financières déjà rares et feraient ainsi obstacle à leurs aspirations de développement économique.

LE MÉCANISME DE KYOTO POUR UN DÉVELOPPEMENT PROPRE

Le Mécanisme pour un développement propre (MDP), modelé sur le concept de mise en œuvre commune, a été introduit à la dernière minute lors de la Conférence de Kyoto organisée en 1997. Le MDP est un instrument qui permettrait aux pays en développement d'assurer leur développement économique tout en offrant l'accès à des ressources additionnelles afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Plus précisément, le MDP, tel qu'il est défini à l'article 12 du Protocole de Kyoto, est un nouveau mécanisme de coopération qui associe les pays en développement dans le but explicite d'aider ces derniers à parvenir à un développement durable et à contribuer à l'objectif ultime de la Convention tout en aidant, dans le même temps, les pays industrialisés à remplir leurs engagements chiffrés de limitation et de réduction de leurs émissions prévus à l'article 3.

La logique du MDP (et de la mise en œuvre commune) repose sur le fait que le coût des mesures de réduction des émissions diffère considérablement d'une région à l'autre, alors que leur impact sur la

stabilité du climat est indépendant de la localisation géographique des émissions ou de la réduction de ces dernières. Ainsi, l'efficacité économique suggère de réduire les émissions là où l'on peut obtenir la réduction la plus importante au meilleur coût. Généralement, les coûts de réduction sont plus faibles dans les régions dotées de centrales électriques et d'équipements anciens ou inefficaces et présentant un fort potentiel de croissance que dans les régions caractérisées par une production et une consommation d'énergie modernes et rationnels et une demande d'énergie quasi-stagnante.

En vertu de ces mécanismes, une entreprise d'un pays visé à l'Annexe I émettant des gaz à effet de serre et recherchant des solutions économiques de réduction des émissions peut investir dans un pays en développement ou dans un autre pays visé à l'Annexe I, éventuellement un pays en transition, si le coût en dollars par tonne d'équivalent carbone (\$/t équivalent C) d'une réduction des émissions est inférieur au coût d'une mesure prise au niveau national. Le pays bénéficiaire obtient des technologies modernes à coût réduit tandis que l'entreprise qui investit reçoit des unités de réduction certifiée des émissions, qui peuvent être prises en compte pour déterminer le respect des engagements nationaux.

S'il est peu probable que la nature exacte des règles qui régissent ce mécanisme (MDP) et sa mise en œuvre, qui font l'objet de négociations entre les Parties à la Convention-cadre sur les changements climatiques, soit définie avant la fin de 2000, il se dégage déjà plusieurs principes :

■ **Additionnalité.** Le projet relevant du MDP doit constituer un investissement qui ne serait autrement pas réalisé par le pays

hôte, par exemple pour des raisons de coût ou de disponibilité des capitaux. Cela nécessite de définir et/ou de spécifier un projet de référence auquel le projet relevant du MDP puisse être comparé. Les réductions d'émissions doivent s'ajouter à celles qui se seraient produites en l'absence du projet relevant du MDP.

■ **Réalité.** Le projet doit se traduire, sur le plan de la réduction des émissions, par des avantages mesurables, réels et durables. Les réductions doivent être réalisées, certifiées, contrôlables et vérifiables.

■ **Durabilité.** Le projet doit contribuer au développement durable du pays bénéficiaire.

En vertu de ces mécanismes, un pays visé à l'Annexe I investirait, dans un pays, dans un projet de technologie propre que celui-ci n'aurait pas les moyens de mettre en œuvre, mais qui émettrait moins de gaz à effet de serre que la technologie moins onéreuse qui aurait été utilisée autrement. Dans le secteur de la production d'électricité, la technologie de référence, pour la plupart des pays non visés à l'Annexe I, est probablement la production d'électricité à l'aide de charbon de faible à moyen rendement, souvent avec des dispositifs antipollution inférieurs à la norme, d'où l'émission d'importantes quantités de polluants. Des centrales nucléaires ou éoliennes pourraient, compte tenu de leur coût d'investissement élevé et de leurs émissions négligeables de gaz à effet de serre et d'autres polluants, bénéficier de ce mécanisme. Des centrales au charbon ayant un rendement de conversion élevé et équipées de dispositifs antipollution pourraient également convenir. On pourrait également, pour réduire les émissions, substituer dans les centrales le gaz naturel au charbon ou améliorer le

LE PROCOTOLE DE KYOTO EN BRIEF

Adopté en 1997, le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques engage les pays industrialisés à atteindre des objectifs individuels et juridiquement contraignants de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre au cours de la période allant de 2008 à 2012, en vue de réduire le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990.

Les objectifs individuels fixés pour ces pays (dits Parties visées à l'Annexe I) sont énumérés à l'Annexe B du Protocole. Les obligations de réduction d'émissions peuvent être résumées comme suit : les pays d'Europe occidentale ont accepté de réduire leurs émissions de 8% par rapport au niveau de 1990, à l'exception de l'Islande et de la Norvège, qui se sont vu autoriser, respectivement, 110% et 101% des émissions de 1990. Les pays de l'Union européenne peuvent s'entendre entre eux sur différents niveaux de réduction des émissions aussi longtemps que le total de leurs émissions reste inférieur de 8% au niveau de 1990.

Les pays d'Europe orientale ont généralement les mêmes obligations que les pays d'Europe occidentale à quelques exceptions près : 95% des émissions de l'année de référence pour la Croatie, et 94% pour la Hongrie et la Pologne. L'année de référence pour les pays de cette région n'est pas nécessairement 1990, mais peut être ultérieure, par exemple 1995. La Fédération de Russie et l'Ukraine ont été autorisées à maintenir leur niveau d'émissions de 1990. Le Japon et le Canada ont accepté de réduire de 6% leurs niveaux de 1990, et les États-Unis de 7%. L'Australie a été autorisée à augmenter ses émissions de 8% par rapport à son niveau de 1990, et la Nouvelle-Zélande à continuer à émettre les mêmes quantités qu'en 1990.

Les réductions d'émissions concernent les six principaux gaz à effet de serre, à savoir le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6), ainsi que certaines activités liées au changement d'affectation des terres et à la foresterie qui absorbent l'oxyde de carbone de l'atmosphère ("puits" de carbone).

Le Protocole institue également trois mécanismes novateurs – la mise en œuvre conjointe, l'échange de droits d'émission et le mécanisme pour un développement propre (MDP), qui ont pour

vocation d'aider les Parties visées à l'Annexe I à réduire les coûts encourus pour atteindre leurs objectifs d'émission. La mise en œuvre conjointe est un mécanisme de coopération associant deux ou plusieurs partenaires de pays devant s'acquitter d'engagements chiffrés en matière de limitation et de réduction (Parties visées à l'Annexe I), mais où les coûts marginaux de réduction des émissions diffèrent nettement. Toute Partie visée à l'Annexe I peut céder à toute autre Partie ayant le même statut, ou acquérir auprès d'elle, des unités de réduction des émissions découlant de projets visant à réduire les émissions anthropiques par les sources ou à renforcer les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre dans tout secteur de l'économie. Le MDP vise également à promouvoir un développement durable dans les pays en développement.

Alors que ces mécanismes dits "de flexibilité" ont été convenus en principe dans le Protocole, il reste maintenant à préciser les détails de leur fonctionnement. En outre, il reste aux Parties à mettre au point le système-cadre de contrôle de l'application prévu dans le Protocole, à élaborer des dispositions relatives au changement d'affectation des terres et à la foresterie, à définir les obligations en matière d'établissement de rapports, et à étudier la vulnérabilité des pays en développement aux changements climatiques et aux mesures de réduction des émissions. À la quatrième Conférence des Parties (CoP-4), en 1998, les Parties ont approuvé à cet effet un programme de travail (le "Plan d'action de Buenos Aires"), qui s'achèvera à la CoP-6 en 2000.

Le Protocole de Kyoto a été ouvert à la signature du 16 mars 1998 au 15 mars 1999. Pendant cette période, 84 pays ont signé le Protocole, indiquant qu'ils acceptaient son texte et avaient l'intention de le ratifier.

Pour pouvoir entrer en vigueur, le Protocole doit maintenant être ratifié par 55 Parties à la Convention, parmi lesquelles les Parties visées à l'Annexe I dont les émissions représentaient, en 1990, 55% des émissions de dioxyde de carbone de ce groupe. Quelques pays ont déjà ratifié le Protocole, mais nombre d'autres attendent l'issue des négociations relatives au fonctionnement du Protocole qui auront lieu à la CoP-6. De nombreuses Parties souhaiteraient que le Protocole entre en vigueur au plus tard en 2002, pour le 10ème anniversaire de la signature de la Convention.



rendement sur l'ensemble du système énergétique.

L'investisseur d'un pays visé à l'Annexe I, disons une entreprise d'électricité qui est obligée de réduire les émissions au plan national, doit maintenant comparer la valeur de ces unités de réduction des émissions aux

solutions et coûts de réduction des émissions au niveau national.

Si le projet relevant du MDP entraîne des coûts de réduction inférieurs, l'entreprise peut choisir de payer l'investissement ou la différence de coût de production entre ce projet et le projet de référence contre des unités de

réduction certifiée des émissions correspondant à la quantité des émissions évitées. Ces unités peuvent ensuite être utilisées par l'entreprise pour s'acquitter de ses engagements.

Le Protocole précise cependant que les mécanismes flexibles utilisés pour s'acquitter

DONNÉES INDICATIVES POUR L'ÉTUDE DE DIFFÉRENTES VARIANTES DE MDP

| Caractéristiques | Unités | Référence Charbon | MDP Charbon | MDP Nucléaire | MDP-Én. éol. | MDP-Gaz |
|-------------------------------------|-----------|----------------------|----------------|------------------|--------------|---------|
| Techniques | | | | | | |
| Durée de vie | année | 25 | 25 | 25 | 15 | 25 |
| Capacité nette | MWe | 600 | 600 | 935 | 12 | 450 |
| Coefficient de charge | % | 75 | 75 | 80 | 40 | 80 |
| Rendement net | % (PCI*) | 33,8 | 47,5 | 33 | 1 | 55 |
| Réduction soufre (SO ₂) | % | 0 | 90 | - | - | - |
| Oxydes d'azote (NO _x) | % | 0 | 80 | - | - | - |
| Particules | % | 99,5 | 99,5 | - | - | - |
| Économiques | | | | | | |
| Coûts d'invest. ** | \$/kWe | 1090 | 1661 | 2432 | 998 | 836 |
| Implantation | % | 100 | 30 | 15 | 15 | 10 |
| Taux d'actual. réel | % | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Coûts E/M fixes | \$/kWe/an | 21,1 | 43,9 | 37,9 | 27,8 | 23,71 |
| Coûts E/M variables | \$/MWh | | | | | |
| Coût combust. | \$/GJ | 1,70 | 1,70 | 0,72 | 0 | 3,9 |
| Émissions & déchets | | | | | | |
| Cendres | g/kWh | 57,9 | 41,4 | - | - | - |
| Boues réduction | g/kWh | - | 20,5 | - | - | - |
| Déchets rad. haute act. | kg/MWh | - | - | x | x | - |
| Métaux lourds | gHM/kWh | 0,038 | 0,027 | - | - | - |
| Dioxyde soufre SO ₂ | g/kWh | 9,09 | 0,65 | - | - | 0,15 |
| Oxydes d'azote NO _x | g/kWh | 3,01 | 0,61 | - | - | 1,13 |
| Monoxyde carbone CO ₂ | g/kWh | 1,08 | 0,77 | - | - | 0,45 |
| Méthane | g/kWh | - | - | - | - | 0,03 |
| Hémioxyde azote N ₂ O | g/kWh | 0,02 | 0,02 | - | - | 0,018 |
| Particules | g/kWh | 0,2 | 0,14 | - | - | 0,045 |
| Dioxyde carbone CO ₂ | g C/kWh | 321 | 230 | - | - | 99 |
| Total émissions | | | | | | |

*Pouvoir calorifique inférieur. **Y compris intérêts pendant construction. Source : AIEA

d'engagements contractés au titre de l'article 3 doivent venir en complément de mesures prises au niveau national. Cela revient à dire que les pays ne peuvent que partiellement s'exonérer des réductions d'émissions imposées au niveau national (les quantités autorisées doivent encore être négociées par les Parties à la Convention).

ÉTUDE SÉLECTIVE DE DIFFÉRENTES VARIANTES DE MDP

On peut, pour illustrer l'évaluation de projets relevant du MDP, recourir à une étude générique hypothétique. Le point de départ est une centrale typique à charbon, c'est-à-dire la solution d'accroissement de capacité la moins coûteuse dans un pays non visé à l'Annexe I. En d'autres

termes, c'est le projet de référence. Par rapport à ce projet de référence, on propose, comme variantes de MDP, une centrale à charbon de type avancé, une centrale nucléaire commerciale standard, un parc d'éoliennes et une turbine à gaz moderne à cycle combiné.

L'évaluation doit comprendre les phases suivantes:

- Détermination de la technologie de référence, c'est-à-dire de la technologie qui serait choisie dans une situation normale (sans considérations liées aux changements climatiques);
- Calcul des coûts de production et des émissions de gaz à effet de serre pour la centrale de référence;
- Choix des variantes de MDP;
- Évaluation des besoins progressifs en investissements et des coûts de production

normalisés pour chaque variante de MDP;

■ Détermination des émissions des gaz à effet de serre évitées pour chaque variante de MDP par rapport à la référence;

■ Calcul du coût spécifique de la réduction des émissions pour chaque variante de MDP en fonction à la fois des coûts d'investissement et des coûts de production totaux normalisés.

Réduction des émissions fondée sur les coûts

d'investissement. À partir des données utilisées dans l'étude, les besoins totaux en investissements sont corrigés en tenant compte des différentes caractéristiques de capacité et de disponibilité des différentes variantes de MDP, y compris la technologie de référence (voir tableau).

L'évaluation des émissions montre que toutes les variantes de

COMPARAISON GÉNÉRIQUE DES COÛTS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

| | Unités | Référence Charbon | MDP- Charbon | MDP- Nucléaire | MDP- Én. éol. | MDP- Gaz |
|---|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------|------------------|-------------|
| Réduction fondée sur les différences de coût d'investissement | | | | | | |
| Coût d'invest. total centrale | Millions US\$ | 654 | 997 | 2274 | 12 | 376 |
| Correction pour capacités et disponibilités | Millions US\$ | 1087 | 1657 | 2274 | 1866 | 782 |
| Investissement MDP | Millions US\$ | - | 569 | 1187 | 1087 | -305 |
| Émissions GES | Millions tC /an | 2.14 | 1.55 | 0 | 0 | 0.69 |
| Émissions GES évitées | Millions tC /an | - | 0.60 | 2.14 | 2.14 | 1.45 |
| Coût de réduction fondé seulement sur le coût d'invest. normalisé | \$/équivalent tC | - | 101 | 57 | 48 | -25 |
| Réduction fondée sur les différences de coût de production normalisé | | | | | | |
| Coût de production total | mills/kWh | 39.60 | 46.39 | 49.25 | 45.38 | 42.93 |
| Total émissions GES | g C/équiv.kWh | 327 | 236 | 0 | 0 | 106 |
| Émissions GES | Millions tC /an | 1.290 | 0.931 | 0 | 0 | 0.333 |
| Réduction des émissions | g C/équiv.kWh | - | 91 | 327 | 327 | 221 |
| Émissions GES évitées | Millions tC/an | - | 0.359 | 1.290 | 1.290 | 0.956 |
| Coût de réduction | \$/t C équivalent | - | 74.6 | 29.5 | 17.7-77.0 | 15.1 |

Notes : MDP = Mécanisme pour un développement propre; GES = gaz à effet de serre. Source : AIEA

MDP produisent des avantages réels, mesurables et durables sur le plan des émissions. Hormis la turbine à gaz à cycle combiné, tous les MDP conviendraient sur le plan de l'additionnalité financière, de la réduction des émissions et du soutien au développement durable (diminution des émissions de polluants nuisant à la qualité de l'air et contribuant à l'acidification des eaux régionales). La turbine à gaz à cycle combiné, solution à moindre coût avec des coûts de réduction négatifs, devrait en fait remplacer la centrale au charbon comme technologie de référence. Le coût de la réduction des émissions (en termes de \$/t équivalent C évitée) est de \$101/tC pour les centrales à charbon de type avancé, \$57/tC pour les centrales nucléaires et \$48/tC pour les éoliennes. Ce calcul, cependant, ne prend en compte que les coûts d'investissement et ignore les coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que le coût du combustible, qui peuvent représenter une part importante des coûts totaux de production.

Réduction des émissions fondée sur les coûts de production totaux. Les coûts de production normalisés sont calculés à partir des données indicatives en supposant l'absence de toute hausse du prix du combustible. Ne sont utilisées que les données concernant la centrale elle-même, sans tenir compte des différentes capacités et disponibilités. Tous les MDP entraînent des coûts de production supérieurs à celui de la technologie de référence (39,60 mills E.-U. par kWh).

MDP-charbon. Vu que la centrale au charbon de type avancé émet annuellement quelque 0,931 million de tonnes de carbone, elle évite l'émission de quelque 0,359 million de tonnes de carbone chaque année par rapport à la centrale de référence au charbon. La compensation totale des émissions ou les émissions évitées pendant la durée de vie du projet relevant du MDP représentent quelque 9 millions de tonnes de carbone. Le coût des émissions de carbone évitées s'élève alors à \$74,6/tC. En d'autres termes, le projet pourrait générer des unités

de réduction des émissions s'levant à \$85/tC.

MDP-nucléaire. Vu que la centrale nucléaire a un coefficient nul d'émission de gaz à effet de serre, la centrale nucléaire relevant du MDP évite l'émission de quelque 1,29 million de tonnes de carbone chaque année par rapport à la centrale de référence au charbon. La compensation totale des émissions pendant la durée de vie du projet représente 32 millions de tonnes de carbone. Le coût des émissions de carbone évitées ou la valeur des unités de réduction des émissions s'élève alors à \$29,5/tC.

MDP-énergie éolienne. De même que le nucléaire, l'énergie éolienne a un coefficient d'émission nul et l'installation éolienne relevant du MDP évite l'émission de quelque 1,29 million de tonnes de carbone chaque année par rapport à la centrale de référence au charbon.

La compensation totale des émissions pendant la durée de vie du projet relevant du MDP représente 19,2 millions de tonnes de carbone. Le coût des émissions de carbone évitées ou la valeur des unités de réduction des émissions

s'élève alors à \$17,7/tC sur la base des coûts de production par différentiel de kWh entre la référence charbon et la variante éolienne.

Cependant, en raison de la nature intermittente de sa disponibilité, la variante éolienne ne remplace pas réellement la capacité de base du charbon. Le calcul du coût de réduction des émissions ne doit donc prendre en compte que le coût du combustible et les coûts variables de l'électricité produite au charbon et non la différence de coût total de production. Ce faisant, on porte la valeur des unités de réduction des émissions de la variante éolienne à \$77/tC.

MDP-gaz. La turbine à gaz à cycle combiné émet quelque 0,333 million de tonnes de carbone par an et évite l'émission de 0,956 million de tonnes de carbone par rapport à la centrale de référence au charbon. La compensation totale des émissions pendant la durée de vie du projet relevant du MDP représente 23,9 millions de tonnes de carbone. Le coût des émissions de carbone évitées ou la valeur des unités de réduction des émissions s'élève à \$15,1/tC. Cet exemple, cependant, suppose l'existence d'une infrastructure d'approvisionnement en gaz, ce qui n'est pas généralement le cas dans les pays en développement. Par conséquent, même si l'économie de ce projet semble attrayante, cette variante ne convient pas aux régions qui ne disposent pas de l'infrastructure nécessaire. L'inclusion des coûts de construction de telles infrastructures pourrait en soi constituer un projet potentiel au titre du MDP.

L'investisseur d'un pays visé à l'Annexe I, disons une entreprise d'électricité, doit maintenant comparer la valeur de ces unités de réduction des émissions aux solutions et coûts de réduction des émissions au niveau national. Si le

projet relevant du MDP entraîne des coûts de réduction inférieurs, l'entreprise peut choisir de payer l'investissement ou la différence de coût de production entre ce projet et le projet de référence contre des unités de réduction certifiée des émissions correspondant à la quantité des émissions évitées. Ces unités peuvent ensuite être utilisées par l'entreprise pour s'acquitter de ses engagements.

La valeur commerciale des unités de réduction certifiée des émissions peut être, en fonction des résultats économiques et du volume des projets mis en œuvre ailleurs au titre du MDP ou de l'échange de droits d'émissions, supérieure ou inférieure aux coûts de réduction calculés dans le présent exemple. De surcroît, l'échange de droits d'émission entre le pays hôte et l'investisseur serait soumis à une négociation. D'autres éléments négociables peuvent être la durée du projet, la question de la dynamique de référence, des pénalités de défaillance, etc., qui peuvent tous peser en faveur ou au détriment d'un projet relevant du MDP. Les avantages économiques pour le partenaire situé dans le pays non visé à l'Annexe I sont notamment le coût inférieur des technologies, parfois le coût inférieur du combustible (dans le cas des variantes avancée à charbon, nucléaire et éolienne), le transfert de technologie, de capitaux et de savoir-faire ainsi que des émissions de polluants locales et régionales nettement inférieures.

Dans cette étude générique, toutes les variantes satisfont au critère d'additionnalité. Elles représentent des décisions d'investissement qui n'auraient pas lieu dans un environnement purement économique, mais qui présentent, sur le plan de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, des avantages évidents et durables. En outre, tous les projets favoriseraient un

développement durable en réduisant les concentrations locales de polluants de l'air et en protégeant la santé et l'environnement.

REPENSER LES CHOIX

En novembre de cette année, la sixième Conférence des Parties (CoP-6) continuera de négocier les règles applicables aux mécanismes flexibles. Les précédentes conférences des Parties ont évité tout débat formel sur un rôle du nucléaire. Il reste à voir si l'énergie nucléaire sera envisagée comme technologie propre et durable. Le rôle de l'énergie nucléaire doit être reconsidéré compte tenu du risque que présentent les changements climatiques, et de la rareté des moyens techniquement et économiquement applicables pour réduire sensiblement les émissions de gaz à effet de serre à court terme. Au moins, il ne faudrait pas imposer des contraintes supplémentaires aux pays qui souhaitent inclure l'énergie nucléaire dans leurs plans de développement durable.

L'énergie nucléaire peut générer des droits d'émission échangeables rentables entre les pays visés à l'Annexe I. Il serait fortement discriminatoire, et infondé sur le plan du droit international, de ne pas autoriser les pays en développement à opérer des choix similaires, par exemple ceux offerts par le MDP.

Le MDP renforce la contribution essentielle que les pays en développement peuvent apporter à la résolution du problème que pose la réduction des futures émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre tout en satisfaisant leurs besoins justifiés en matière de développement économique. Financer des projets nucléaires dans les pays en développement en échange de droits d'émission atteint ces deux objectifs. □

LES FORCES AGISSANTES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LES DERNIERS SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DU GIEC

VLADIMIR KAGRAMANIAN, SERGUEI KONONOV ET HANS-HOLGER ROGNER

La façon dont le monde évoluera au cours des 100 prochaines années est très incertaine. Néanmoins, les analystes peuvent, pour dresser un tableau de l'avenir – en fait plusieurs tableaux en fonction des hypothèses qu'ils utilisent – analyser différentes voies de développement et divers ensembles de forces agissantes.

Au cours des décennies écoulées, les scientifiques et chercheurs se sont longuement employés à étudier les changements climatiques et à modéliser leur future évolution, leur impact et différentes façons d'atténuer leurs effets potentiels. Ces études sont complexes et nécessitent d'observer les évolutions sociales, économiques et technologiques qui interviennent dans différents domaines.

Au début de 2000, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a approuvé un rapport spécial sur les scénarios d'émissions (*Special Report on Emission Scenarios – SRES*) couvrant la période allant jusqu'en 2100. Ce rapport contient 40 scénarios élaborés à l'aide de six modèles informatiques, couvre le monde et ses principales régions, et est largement centré sur les principaux gaz à effet de serre et le dioxyde de soufre. Les scénarios sont conçus pour permettre l'évaluation des changements climatiques et de leur impact (*voir encadrés, pages 32 et 33*).

Les nouveaux scénarios sont des scénarios de "non intervention"

face aux changements climatiques – c'est-à-dire qu'ils excluent toute mesure visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les mesures visant d'autres facteurs environnementaux sont prises en compte, comme par exemple l'amélioration des techniques de réduction des émissions de soufre dans les pays en développement, qui se traduit par une réduction des émissions mondiales de dioxyde de soufre par rapport à celles relevées dans les études précédentes du GIEC.

Le présent article examine brièvement les derniers scénarios d'émissions du GIEC et se penche de près sur le rôle prévu de l'énergie nucléaire, rôle qui peut offrir d'intéressantes perspectives à long terme pour le développement du nucléaire. Cette perspective est particulièrement intéressante car, dans les scénarios, les possibles "futurs nucléaires" ont été modélisés sans tenir compte de considérations spécifiquement liées aux changements climatiques. Au contraire, les scénarios se sont concentrés sur la concurrence technique et économique qui existe entre les options d'approvisionnement énergétique, et qui est la force essentielle qui détermine la part relative des différents combustibles dans le système énergétique.

CARACTÉRISTIQUES DE BASE DES SCÉNARIOS

Les 40 scénarios SRES se répartissent en quatre groupes

(appelés "familles de scénarios") : A1 (17 scénarios); A2 (6 scénarios); B1 (9 scénarios); et B2 (8 scénarios). Chaque famille de scénarios repose sur un ensemble d'orientations qualitatives (appelé "canevas"). Un scénario représentatif (appelé "scénario marqueur" ou "marqueur") a été choisi pour illustrer chaque canevas. Cela ne signifie pas, pour autant, qu'il a une probabilité plus élevée que les autres scénarios (*voir encadré, page 32*).

PART DU NUCLÉAIRE ET DOSAGE DES DIFFÉRENTES FORMES D'ÉNERGIE

Le SRES adopte une conception dynamique des ressources et des techniques énergétiques – en d'autres termes, l'amélioration des techniques offre de nouvelles perspectives de développement des ressources.

La répartition des différentes formes d'énergie primaire, pour les quatre scénarios marqueurs, fait ressortir les éléments suivants :

- On relève une nette augmentation de l'énergie primaire d'ici à 2100 – de 40% en B1 à un sextuplement en A1;
- Tous les scénarios font apparaître une nette diminution de la part des combustibles fossiles;

MM. Kagramanian et Kononov travaillent à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA, section que dirige M. Rogner.

LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DU GIEC

Il y a une dizaine d'années, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) – établi conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) – a élaboré ses premiers scénarios d'émissions à long terme, utilisés pour analyser la question complexe des changements climatiques. Au début de 2000, le GIEC a publié un nouvel ensemble de scénarios reflétant les avancées scientifiques les plus récentes. Comme l'indique un *Résumé à l'intention des décideurs*, les scénarios permettent différentes interprétations et reposent sur l'étude extensive de publications et d'évolutions.

Les futures émissions de gaz à effet de serre sont le produit de systèmes dynamiques très complexes déterminés par des forces agissantes telles que le développement démographique, le développement socio-économique et le progrès technologique. Leur évolution est très incertaine et les scénarios présentent différents tableaux de la façon dont la situation pourrait évoluer. À ce titre, ils sont utiles pour, d'une part, analyser la façon dont les forces agissantes pourraient influencer les futures émissions et, d'autre part, évaluer les incertitudes liées à cette influence. Ils aident aussi à analyser les changements climatiques, notamment à modéliser les climats et à évaluer leurs incidences et les mesures possibles d'adaptation et d'atténuation.

Les derniers scénarios du GIEC couvrent une grande partie des principales forces agissantes des émissions de gaz à effet de serre et de soufre. Chaque scénario représente une interprétation quantitative précise de l'un des quatre canevas. Chaque canevas suppose une direction distincte des futures évolutions sur le plan démographique, social, économique, technologique et environnemental. Tous les scénarios qui reposent sur le même canevas forment une "famille" de scénarios.

Au total, 40 scénarios ont été élaborés en utilisant une approche multimodèles. Treize d'entre eux étudient des variations des hypothèses relatives aux technologies énergétiques. Aucun des 40 scénarios ne suppose expressément l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou des objectifs du Protocole de Kyoto relatif aux émissions. Cependant, l'influence des politiques non climatiques sur les émissions de gaz à effet de serre est largement reflétée dans les canevas et les scénarios.

■ **Le canevas et la famille de scénarios A1** décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le



Photo : C. Sherburne/PhotoLink

revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes se distinguent par leur accent technologique : forte intensité de combustibles fossiles, sources d'énergie autres que fossiles et équilibre entre les sources.

■ **Le canevas et la famille de scénarios A2** décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

■ **Le canevas et la famille de scénarios B1** décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficace. L'accent est sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

■ **Le canevas et la famille de scénarios B2** décrivent un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Pour de plus amples renseignements sur le GIEC et sur les scénarios d'émissions, consulter le site Internet du GIEC à l'adresse : <http://www.ipcc.ch>.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES CANEVAS ET FAMILLES DE SCÉNARIOS "MARQUEURS" DU GIEC

| Famille de scénarios | Canevas | Population mondiale (milliards) | | | PIB par habitant (milliers de \$ 1990) | | | Énergie primaire (Gigajoules par habitant) | | | CO ₂ (Gigatonnes de carbone) (annuel/cumulé) | | | Source d'énergie primaire | Parts de l'énergie primaire | | |
|----------------------|--|---------------------------------|------|------|--|------|------|--|------|------|---|------|------|------------------------------------|-----------------------------|------------|--------|
| | | 1990 | 2050 | 2100 | 1990 | 2050 | 2100 | 1990 | 2050 | 2100 | 1990 | 2050 | 2100 | | 1996 | 2050 | 2100 |
| A1 | Forte croissance économique, faible croissance démographique, rapide introduction de nouvelles technologies; convergence vers un "monde homogénéisé" avec atténuation des différences régionales | 5.3 | 8.7 | 7.1 | 4.0 | 20.8 | 74.9 | 66 | 138 | 295 | 7.1 | 16.4 | 13.5 | Combustibles fossiles | 83.4% | 59.9% | 30.7% |
| | | | | | | | | | | | -- | -- | -- | Énergies renouvelables* | 14.3% | 29.9% | 65.5% |
| | | | | | | | | | | | - | 738 | 1499 | Nucléaire (1)** | 2.3% | 10.2% | 3.7% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire (2) | 6.5% | 25.6% | 10.5% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire, GWe*** | 351 | ~5600 | ~3500 |
| A2 | Évolution vers un "monde hétérogène": non convergence des schémas de fécondité, forte croissance démographique, développement économique toujours fragmenté par régions | 5.3 | 11.3 | 15.1 | 3.8 | 7.2 | 16.1 | 59 | 86 | 114 | 7.1 | 17.4 | 29.1 | Combustibles fossiles | 83.4% | 82.0% | 71.9% |
| | | | | | | | | | | | -- | -- | -- | Énergies renouvelables | 14.3% | 11.6% | 14.4% |
| | | | | | | | | | | | - | 736 | 1862 | Nucléaire (1) | 2.3% | 6.4% | 13.6% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire (2) | 6.5% | 17.1% | 32.4% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire, GWe | 351 | ~2800 | ~10600 |
| B1 | "Monde homogène" comme en A1, mais avec "dématérialisation" de l'économie (services et information prédominants); modélisation d'un accent sur la viabilité mondiale | 5.3 | 8.7 | 7.0 | 4.0 | 15.6 | 46.6 | 70 | 93 | 73 | 7.1 | 11.3 | 4.2 | Combustibles fossiles | 83.4% | 69.8% | 47.7% |
| | | | | | | | | | | | -- | -- | -- | Nucléaire + Énergies renouvelables | 16.6% | 30.2% | 52.3% |
| | | | | | | | | | | | - | 606 | 983 | Nucléaire, GWe | 351 | non estimé | |
| B2 | "Monde hétérogène" comme en A2, mais avec attention accrue portée à la viabilité; recherche de solutions pertinentes mais, contrairement à B1, au niveau régional | 5.3 | 9.4 | 10.4 | 4.0 | 11.7 | 22.6 | 67 | 93 | 130 | 7.1 | 11.0 | 13.3 | Combustibles fossiles | 83.4% | 70.2% | 50.7% |
| | | | | | | | | | | | -- | -- | -- | Énergies renouvelables | 14.3% | 24.4% | 38.8% |
| | | | | | | | | | | | - | 562 | 1164 | Nucléaire (1) | 2.3% | 5.5% | 10.5% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire (2) | 6.5% | 14.9% | 26.1% |
| | | | | | | | | | | | | | | Nucléaire, GWe | 351 | ~2200 | ~4400 |

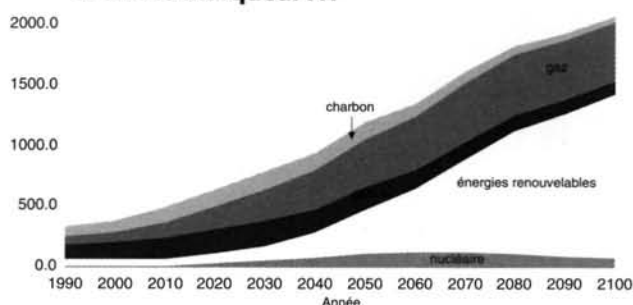
*Les énergies renouvelables incluent l'hydroélectricité, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse.

**Deux ensembles de données – nucléaire (1) et nucléaire (2) – reflètent des différences de méthode de calcul. Nucléaire (1) reflète le recalcul SRES de la part du nucléaire dans l'approvisionnement en énergie primaire. Le SRES a converti l'électricité d'origine nucléaire en énergie primaire en convertissant les unités de térawatts/heure en exajoules. Il en résulte, pour le nucléaire, des parts atteignant environ 2% en 1996, ce qui diffère du chiffre plus habituel de 7% obtenu en tenant compte du rendement thermique des centrales nucléaires. Nucléaire (2) applique la méthode utilisée par l'Agence internationale de l'énergie de l'Organisation de coopération et de développement économiques et figure en italiques pour refléter les différences.

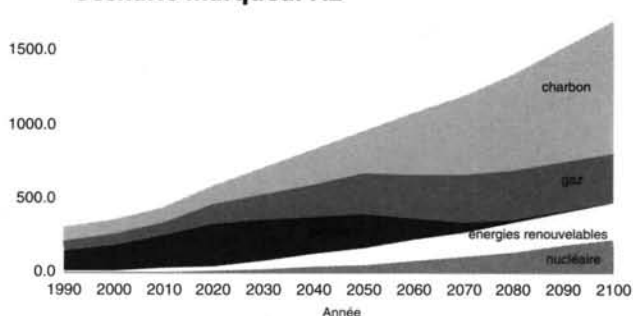
***La capacité est estimée sur la base des résultats SRES en énergie primaire exprimée en E (énergie en EJ) 31,71 (conversion en GW par an) /0,7 (coefficient d'utilisation moyen supposé).

STRUCTURE DE L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE DANS LES SCÉNARIOS MARQUEURS DU GIEC (EXAJOULES)

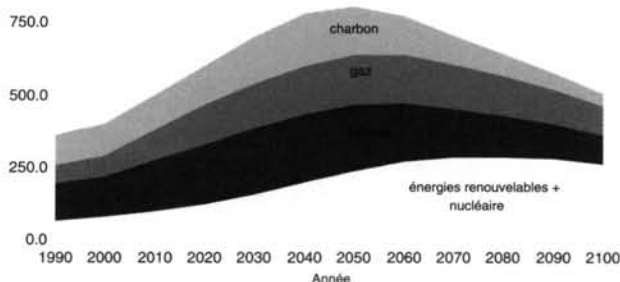
Scénario marqueur A1



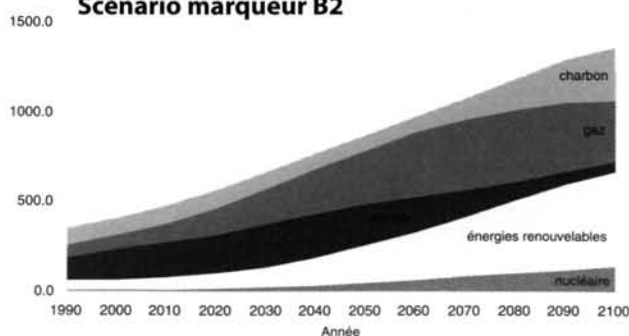
Scénario marqueur A2



Scénario marqueur B1



Scénario marqueur B2



■ La part combinée des énergies renouvelables et de l'énergie nucléaire augmente de deux à trois fois d'ici à 2100;

■ Dans le groupe croissant des sources d'énergie non fossiles, on observe une part variable du nucléaire. Les 6 à 7% de part du nucléaire dans l'énergie primaire pourraient atteindre de 10 à 30% d'ici à 2100. Cela équivaudrait à une capacité nucléaire totale de 3500 à 10600 gigawatts électriques (GWe).

Pour évaluer ce tableau prévisionnel, il importe de se souvenir que les scénarios reposent sur différentes hypothèses de développement technique et économique. Il en résulte les conséquences suivantes :

■ Dans le scénario marqueur A1, les énergies renouvelables devancent tant les combustibles fossiles que l'énergie nucléaire sur le plan de la performance économique. Même si la part du nucléaire augmente considérablement jusqu'en 2050, ce facteur entraîne son déclin ultérieur d'un maximum d'environ 5500 GWe en 2050 à 3500 GWe en 2100.

■ Le scénario marqueur A2 suppose le progrès le plus rapide des technologies liées au charbon, la pénétration des énergies renouvelables étant considérée comme plus progressive. L'énergie nucléaire reste compétitive et sa capacité augmente jusqu'à 10600 GWe.

■ Dans le scénario marqueur B1, la part des sources d'énergie non fossiles atteint environ 50% en 2100. Pour ce marqueur, on n'a pas calculé les parts distinctes du nucléaire et des énergies renouvelables. La fourchette des possibilités est illustrée par deux cas "non marqueurs" extrêmes de la famille B1. Dans ces scénarios, les parts du nucléaire en 2100 sont respectivement de 340 GWe et 4200 GWe, ce qui prouve que l'avenir du nucléaire peut

largement différer selon sa compétitivité par rapport aux énergies renouvelables.

■ Dans le scénario marqueur B2, les capacités du nucléaire atteignent 6400 GWe en 2100. Cela reflète le ralentissement prévu du progrès des énergies renouvelables et un schéma régional de développement qui fait droit à l'énergie nucléaire lorsqu'elle a fait la preuve de sa viabilité.

DIMENSIONS RÉGIONALES DES SCÉNARIOS

Le SRES est structuré suivant quatre régions planétaires. Ces régions sont désignées OECD90 (tous les membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques en 1990), REF (pays d'Europe centrale et orientale plus États nouvellement indépendants de l'ex-Union soviétique), ASIA (tous les pays en développement d'Asie), et ALM (reste du monde).

Les scénarios montrent que le développement du nucléaire peut varier d'une région à l'autre ou dans le monde. Par exemple, la capacité nucléaire prévue en 2100 dans le groupe OECD90 dans les scénarios A1 et A2 est respectivement de 680 GWe et 3300 GWe; dans le groupe ASIA, les projections correspondantes sont de 1400 GWe et 4100 GWe.

Cela indique un transfert important du développement du nucléaire du groupe OECD90 vers le groupe ASIA et, dans une moindre mesure, ALM. Par exemple, dès 2050, les scénarios A1 et A2 projettent tous deux des capacités nucléaires plus importantes dans le groupe ASIA que dans le groupe OECD90.

RÉCAPITULATIF DES TABLEAUX

Pour résumer, les nouveaux scénarios d'émissions du GIEC

font apparaître, pour l'énergie nucléaire, les fourchettes de développement suivantes :

■ La plupart des scénarios supposent que l'énergie nucléaire conserverait son rôle important dans l'approvisionnement énergétique mondial. En 2100, la capacité nucléaire mondiale projetée pour trois des quatre scénarios représentatifs varie entre 3500 GWe et 10600 GWe, en fonction de la mesure dans laquelle l'énergie nucléaire réussit à concurrencer les combustibles fossiles et les énergies renouvelables. On peut comparer ce chiffre aux quelque 350 GWe de capacité nucléaire actuelle.

■ Dans le même temps, certains scénarios montrent qu'une amélioration rapide des énergies renouvelables (par rapport aux techniques nucléaires) peut entraîner une stagnation, voire un déclin du nucléaire.

Dans un tel scénario, la capacité nucléaire totale atteint un maximum de 5500 GWe vers le milieu du siècle pour décliner ensuite à 3500 GWe en 2100. D'autres scénarios indiquent la stagnation des capacités nucléaires au niveau actuel. Ainsi, le SRES confirme que le rôle à long terme de l'énergie nucléaire est très incertain, en particulier du fait de l'incertitude relative à la compétitivité escomptée des différentes techniques énergétiques.

■ Sur le plan régional, les pays d'Asie devraient voir leur consommation d'énergie nucléaire augmenter considérablement; les taux de croissance du nucléaire dans les autres régions sont plus faibles. Contrairement à la situation actuelle, il pourrait exister, en 2050, une capacité nucléaire plus importante en Asie que dans les pays de l'OCDE.

■ Pour que la part du nucléaire dans la production d'électricité soit plus importante, il faudrait

que les centrales nucléaires connaissent des améliorations techniques importantes pour rester compétitives avec les meilleures autres technologies. Une croissance importante exigerait d'améliorer le rendement de l'uranium dans les réacteurs ainsi que les méthodes de gestion des déchets.

Dans la plupart des scénarios, le SRES suppose d'importantes améliorations (variables selon le scénario) des techniques nucléaires par rapport à celles existantes. Cependant, comme pour les techniques non nucléaires, ces changements ont été introduits par le SRES de façon générique sous la forme de réductions des coûts, les solutions spécifiques n'étant pas prises en compte. L'existence de telles solutions serait très importante, de même qu'une attitude positive de la société vis-à-vis de l'énergie nucléaire (ce qui n'a pas été explicitement analysé dans le SRES).

■ Le mandat du SRES lui imposait d'exclure, dans ses scénarios, les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces politiques, si elles sont mises en œuvre, pourraient avoir une incidence positive supplémentaire sur les solutions énergétiques non fossiles, y compris l'énergie nucléaire.

Globalement, l'étude du GIEC montre que le futur développement de l'énergie nucléaire ne dépend pas nécessairement de considérations liées aux changements climatiques, et que l'option nucléaire devrait continuer d'occuper une part notable dans le dosage des différentes formes d'énergie quelles que soient les politiques mises en œuvre pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il s'agit là d'importants messages d'une étude à long terme approfondie couvrant la période allant jusqu'à la fin du XXI^e siècle. □

COMPÉTITIVITÉ ÉCONOMIQUE DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DES OBJECTIFS ÉVOLUTIFS

HANS-HOLGER ROGNER ET LUCILLE LANGLOIS



La plupart des marchés de l'électricité s'orientent actuellement vers une concurrence accrue, induite en partie par la technologie, par le faible prix des combustibles et par l'expérience qui montre que les marchés concurrentiels sont plus autonomes. L'électricité est vendue, dans plusieurs pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), environ 0,02 dollars le kilowatt-heure (kWh). Le nucléaire peut-il concurrencer de tels prix ? Dans la négative, que faire pour que ce soit le cas ?

Les compagnies d'électricité ont maintenant pour objet de vendre un produit (kWh) et des services commerciaux, et non plus un bien stratégique. Les excédents de capacité, la faible croissance de la demande et la diminution du prix des produits dans les grands pays industrialisés ont contraint les producteurs d'électricité et leurs fournisseurs à se préoccuper davantage de leurs coûts d'exploitation et de la rentabilité de leurs investissements. Ces compagnies doivent de plus en

plus adopter une démarche commerciale axée sur le profit si elles veulent survivre et prospérer. Qui plus est, elles vont devoir, dans les prochaines années, opérer d'importantes réductions de coûts. L'industrie du nucléaire ne fait pas exception à la règle.

Comment l'énergie nucléaire s'en sort-elle dans cet environnement ? La Section de la planification et des études économiques réalise une série d'études portant précisément sur ces questions, chacune évoquant des points intéressant l'avenir à court, moyen et long termes de l'énergie nucléaire. Il s'agit en gros de points ayant trait aux centrales existantes, aux améliorations et aux prolongements de la durée de vie, et aux nouvelles centrales. En règle générale, il ressort des études que l'énergie nucléaire peut être compétitive sur ces trois plans. Pour concrétiser ce potentiel, toutefois, il faudra que l'industrie et ses organismes de réglementation opèrent d'importants changements.

Le présent article examine principalement la situation commerciale qui prévaut dans de nombreux pays industrialisés. Plusieurs

enseignements peuvent également s'appliquer aux pays en développement, en particulier lorsque le financement de projets électro-énergétiques doit provenir de marchés de capitaux internationaux. La situation globale est nettement différente dans les pays en développement. Généralement, la capacité de production d'électricité y reste insuffisante, et le niveau des recettes couvrant les coûts de production et de financement pose des problèmes fondamentaux pour ce qui est du futur développement de cette capacité. En conséquence, pour être compétitifs, les prix doivent refléter les coûts marginaux à long terme et pas seulement les coûts d'exploitation.

EXPLOITATION DES CENTRALES NUCLÉAIRES

Pour les centrales nucléaires existantes qui approchent de l'amortissement complet, les recettes n'ont besoin de couvrir que les coûts d'exploitation marginaux pour être rentables. C'est ainsi que de nombreuses centrales nucléaires bien gérées bénéficient actuellement d'un avantage sur le plan des coûts. Aux

M. Rogner dirige la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA, et Mme Langlois travaille dans cette section. Les références complètes du présent article sont disponibles auprès des auteurs.

Photo : Les centrales nucléaires produisent environ un sixième de l'électricité mondiale.

États-Unis, par exemple, plus des deux tiers des centrales nucléaires produiraient de l'électricité à un coût inférieur à la moyenne nationale, qui avoisine 0,02 dollars par kWh.

Cependant, le coût moyen de production de toutes les techniques diminuant, les centrales nucléaires vont perdre de leur avantage comparatif. À mesure que les marges de trésorerie nettes convergent du fait de la concurrence, les exploitants de centrales nucléaires vont devoir réduire les coûts et accroître encore davantage leurs marges de trésorerie nettes pour survivre.

La différence entre la réussite et l'échec dépend de plusieurs facteurs, dont l'astuce des décisions relatives au financement et au choix des techniques ainsi que la juste estimation de la croissance de la demande, associée à une bonne gestion permettant de maîtriser les coûts et de réaliser des gains de productivité. Au bout du compte, toutefois, la variable la plus importante, en matière de viabilité économique, est le coût marginal par kWh produit par rapport au prix du marché et au coût marginal des modes de production concurrents.

Un exploitant de centrale nucléaire doit être capable de réduire les coûts, en particulier les coûts d'exploitation et de maintenance, sans compromettre la sûreté et en assurant un taux élevé de disponibilité de la centrale. D'intenses pressions économiques vont s'exercer dans ces deux domaines. Au cours de la décennie écoulée, la plupart des centrales nucléaires compétitives ont déjà amélioré dans une mesure importante, voire considérable, leur disponibilité et opéré d'importantes, voire considérables, réductions des coûts d'exploitation et de maintenance. Les coûts d'exploitation ont parfois chuté de 40%.

Le coût du respect des règles de sûreté a eu de profondes

répercussions sur les coûts de production des centrales nucléaires. Lors de la libéralisation du marché de l'électricité, on a craint que la pression liée à la mise en concurrence ne compromette la sûreté d'exploitation. Depuis, l'expérience a montré que cela n'a pas besoin d'être le cas. Des études réalisées au Royaume-Uni et aux États-Unis montrent une forte corrélation entre les centrales nucléaires obtenant les meilleurs résultats commerciaux et celles qui sont les plus sûres. Dans ces cas, la sûreté n'a pas été compromise, mais plutôt intégrée aux contraintes commerciales de la centrale.

Il existe, en fait, en matière de sûreté d'exploitation des centrales nucléaires, un puissant aspect commercial : dans le secteur privatisé, les gestionnaires sont fortement incités à protéger les avoirs productifs des actionnaires. Économiser au détriment de la sûreté peut être coûteux sur le plan commercial, les organes de réglementation nucléaire pouvant alors exiger la fermeture de la centrale (comme, par exemple, en Ontario en 1997), ce qui génère des coûts sans dégager de recettes. En revanche, les centrales qui manquent de liquidités ne peuvent financer les opérations nécessaires de maintenance, de réparation ou d'amélioration, même si ces dernières sont étroitement liées à la sûreté. Les centrales non rentables, quel que soit leur niveau de sûreté, seront fermées par leurs propriétaires.

CENTRALES NON ACHEVÉES ET PROLONGEMENT DE LA DURÉE DE VIE

Le vieillissement du parc mondial de centrales nucléaires et les possibilités de prolongement de leur durée de vie sont des questions qui présentent un intérêt considérable. L'achèvement

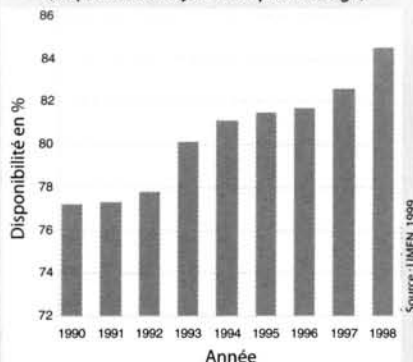
de centrales nucléaires non terminées ou le prolongement de la durée de vie de centrales qui fonctionnent bien peut offrir une solution de substitution économiquement intéressante et pratique à la construction de nouvelles

centrales ou au déclassement de centrales anciennes. Les décisions, cependant, doivent être mûrement pesées.

Toute décision concernant l'achèvement d'un projet, le renouvellement de l'autorisation d'exploitation ou le prolongement de la durée de vie d'une centrale en fonctionnement tourne autour du fait de savoir si le projet est financièrement rentable ou non. Cette évaluation financière, dans sa forme la plus simple, compare seulement trois éléments : le montant actuel net du coût d'achèvement, le montant actuel net des futures recettes attendues du projet achevé (recettes de production moins coûts, actualisés en fonction de la stratégie de l'entreprise), et le coût de fermeture de la centrale ou d'interruption de sa construction. Une fois ces chiffres calculés et comparés, il est plus facile de prendre une décision. Cela vaut même lorsque le projet est financé par l'État ou lorsque la décision à prendre est de nature "défensive" – lorsqu'il faut choisir, par exemple, la solution qui perd le moins d'argent.

Achèvement de projets. Il est tentant de supposer que c'est la situation actuelle d'un projet qui sert de base pour décider de son achèvement. Ainsi, une centrale construite à 90% apparaît mieux placée qu'une autre achevée à 60%. Or, il y a parfois peu de

PERFORMANCE DES CENTRALES NUCLÉAIRES DANS LES ANNÉES 90
(disponibilité moyenne en pourcentage)



rapport entre l'estimation technique du degré d'achèvement et les coûts restants, et ce sont ces coûts qui déterminent la future décision d'investissement. Dans une centrale achevée à 90%, ce n'est pas nécessairement 10% du coût qui reste impayé. Le coût d'investissement restant peut être inférieur, mais il est très souvent supérieur, parfois même supérieur aux recettes attendues de la centrale achevée.

On notera que l'interruption d'un projet de construction est potentiellement onéreuse, la plupart des contrats de construction prévoyant des indemnités d'annulation ou des pénalités si le projet est interrompu. Il est parfois plus économique d'achever le projet à perte que de l'interrompre. Une situation analogue se présente lorsqu'on s'interroge, sur la base de la valeur actuelle nette, sur l'opportunité de fermer une centrale nucléaire en fonctionnement. La fermeture d'une centrale entraîne de nombreux coûts et la compagnie a parfois davantage intérêt à l'exploiter à perte.

Prolongement de la durée de vie. Cette solution offre la possibilité de continuer à exploiter de façon profitable une centrale nucléaire de court à moyen terme. Un prolongement présente, par rapport à la construction de nouvelles centrales, de nombreux avantages importants.

D'une part, les dépenses d'investissement liées à un prolongement de la durée de vie, même si elles ne sont pas négligeables, sont inférieures à celles engagées pour une nouvelle centrale (nucléaire ou autre) et peuvent n'en représenter qu'une fraction, notamment parce que les dépenses liées aux travaux de génie civil, à l'acquisition de terrains et à la préparation du site n'ont plus lieu d'être. Un autre point est que les dépenses d'exploitation sont

déjà faibles, faute de quoi un prolongement ne serait pas envisagé. Le fonds de déclassement de la centrale sera aussi intégralement liquidé, ce qui réduit encore les dépenses d'exploitation. D'autre part, les centrales dont on envisage de prolonger la durée de vie sont généralement peu endettées, étant largement amorties lors du renouvellement; elles disposent en outre d'un flux de recettes leur permettant de rembourser les obligations financières contractées pour le prolongement de la durée de vie. En supposant que les calculs économiques soient fondés, le financement devrait donc poser moins de problèmes.

Un prolongement de la durée de vie peut aussi entraîner une augmentation de la puissance nominale et, partant, l'ajout effectif de nouvelles capacités. Des augmentations de puissance nominale de 10% et plus ont été réalisées dans de nombreuses centrales. Cette solution est intéressante car elle réduit les coûts de production.

Le prolongement de la durée de vie de centrales nucléaires peut également présenter un intérêt écologique. C'est le cas lorsque le respect de normes de pollution de l'air ou d'engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre militent contre l'augmentation de la production d'électricité au moyen de combustibles fossiles.

Toutes les mesures possibles doivent être prises pour réduire les coûts prévisionnels d'achèvement avant de décider quelque investissement que ce soit. Ne pas le faire risquerait de fausser la décision d'investissement, de compliquer le financement et d'aboutir à une production non commercialisable. Dans les projets d'achèvement, en particulier, lorsque l'expérience antérieure en matière de maîtrise des coûts et de gestion des risques n'a probablement

pas été bonne, les investisseurs doivent être assurés d'un rendement sur investissement, ce qui peut nécessiter de libérer le projet des dettes antérieures. Les contrats doivent comprendre des clauses incitant à éviter les retards de construction et prévoir une maîtrise des dépenses d'équipement passant par un contrôle d'inventaire, la mise en concurrence des achats, un équilibre des matériaux locaux et d'importation, et l'utilisation de produits suffisants et économiques de préférence à des produits "haut de gamme".

Amélioration de la sûreté. Il peut être indispensable d'améliorer la sûreté d'une centrale pour poursuivre son exploitation, qu'il s'agisse de protéger ses actifs ou de conserver l'autorisation. Lorsque cette amélioration n'accroît ni la production ni les recettes, les propriétaires peuvent se trouver confrontés à des investissements qu'ils ne peuvent escompter amortir. Si le maintien de l'autorisation par l'organisme de réglementation dépend de l'amélioration, cet investissement doit être pesé en mettant en balance les recettes escomptées et le coût d'une fermeture de la centrale. Une analyse financière de la valeur actuelle nette permettra de déterminer les avantages économiques de chaque choix.

NOUVELLES CENTRALES NUCLÉAIRES

De nouvelles centrales nucléaires peuvent coûter deux à quatre fois plus cher à construire que des centrales à combustibles fossiles. Cela exclut le coût de risques qui influent sur la capacité d'emprunt d'un projet, tels que le non-achèvement, les fluctuations de change et les dépassements de coûts. L'OCDE, dans ses règles d'investissement, ajoute systématiquement, pour tous les crédits à l'exportation de l'OCDE

concernant des centrales nucléaires, une prime de risque de 1% aux taux d'escompte. Ces risques et coûts peuvent-ils être réduits ou suffisamment assurés pour que le nucléaire soit compétitif et obtienne, sur les marchés de capitaux, des financements destinés à de nouvelles centrales nucléaires ?

Les objectifs commerciaux ont évolué rapidement à mesure que les coûts de production se sont effondrés. En 1995, l'objectif à atteindre pour qu'une nouvelle centrale nucléaire soit compétitive aux États-Unis était de 0,043 dollar par kWh. En 1998, le coût estimatif devait être inférieur à 0,03 dollar par kWh, hors intervention des pouvoirs publics, pour qu'une centrale soit potentiellement rentable. En 2000, la moyenne est passée à 0,02 dollar et, en l'absence d'augmentation substantielle de la demande d'électricité (besoin de nouvelles capacités) ou de hausse du prix des combustibles fossiles, elle pourrait encore chuter. Cette chute des coûts de production n'a pas résulté uniquement de la concurrence, mais également de la faiblesse des prix du combustible et de l'amélioration importante du rendement thermique des centrales à charbon et à gaz. Le rendement thermique des centrales à gaz est maintenant nettement supérieur à 50%.

Une étude des coûts prévisionnels de la production d'électricité (OCDE, 1998) fait apparaître, pour les nouvelles centrales nucléaires construites dans le monde, des dépenses d'investissement brutes comprises entre 1400 et 2800 dollars par kWe (taux d'actualisation : 5%) et entre 1700 et 3100 dollars par kWe (taux d'actualisation : 10%), y compris les intérêts accumulés pendant la construction. Dans ces comparaisons de coûts, l'énergie nucléaire est, à un taux d'actualisation de 5%, la solution

| | Coût par kWe installé | Coût total pour capacité 1000 MW | Période de construction | Taille typique de la centrale | Coût typique centrale clés en main |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | \$ | Milliards de \$ | Années | MW | Milliards \$ |
| Nucléaire, REO | 2100 – 3100 | 2.1 – 3.1 | 6 – 8 | 600 – 1750 | 1.5 – 4.2 |
| Nucléaire, meilleure pratique | 1700 – 2100 | 1.7 – 2.1 | 4 – 6 | 800 – 1000 | 1.3 – 2.1 |
| Charbon, pulvérisé, PES | 1000 – 1300 | 1.0 – 1.3 | 3 – 5 | 400 – 1000 | 0.5 – 1.3 |
| Charbon, DGC, PES, RCS | 1300 – 2500 | 1.3 – 2.5 | 4 – 5 | 400 – 1000 | 0.6 – 2.5 |
| Gaz naturel TGCC | 450 – 900 | 0.45 – 0.9 | 1.5 – 3 | 250 – 750 | 0.2 – 0.6 |
| Énergie éolienne | 900 – 1900 | 0.9 – 1.9 | 0.4 | 20 – 100 | 0.03 – 0.12 |

Notes : Tous les coûts comprennent les intérêts accumulés pendant la construction. Les coûts par kWe installé s'entendent à un taux d'actualisation de 10%. REO = réacteur à eau ordinaire; PES = précipitateur électrostatique; DGC = désulfuration des gaz de combustion; RCS = réduction catalytique sélective; TGCC = turbine à gaz à cycle combiné. Source : OCDE, 1998

la moins coûteuse dans six pays et, à un taux d'actualisation de 10%, la moins coûteuse dans deux pays.

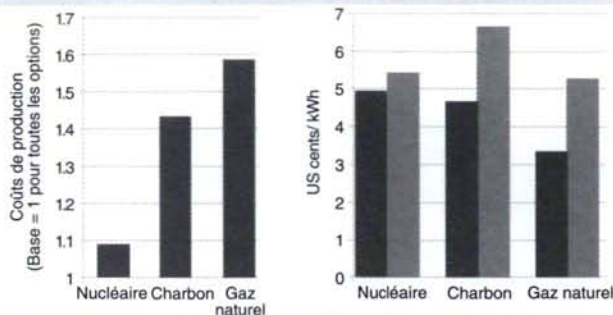
La structure des coûts de ces différents modes de production diffère du point de vue de la sensibilité. En raison du niveau élevé des dépenses d'investissement et des longs délais de réalisation, les coûts liés à l'énergie nucléaire sont très sensibles aux taux d'intérêt. Pour les centrales à charbon, les dépenses d'investissement varient grandement en fonction des normes d'atténuation de la pollution. Les coûts liés aux centrales à gaz, quant à eux, sont très sensibles au prix du gaz, qui représente un pourcentage relativement élevé du coût total (*voir graphiques*). En cas de doublement du prix du combustible, les centrales nucléaires voient leurs coûts augmenter de moins de 10% tandis que les centrales à gaz voient les leurs augmenter de presque 60%. La présence du nucléaire parmi les modes de production d'électricité protège contre la volatilité des prix du combustible et des taux d'intérêt.

Dans ce contexte évolutif, va-t-on construire de nouvelles centrales nucléaires ? L'énergie nucléaire risque, en raison de son coût, de disparaître des futurs marchés à moins que ce secteur ne prenne des mesures draconiennes pour réduire, dans les nouvelles centrales, ses dépenses

d'investissement et les risques financiers. Le nucléaire présente, il est vrai, des avantages évidents : faible coût du combustible, sécurité de l'approvisionnement, impact minime sur l'environnement, faibles coûts externes et important potentiel d'atténuation des gaz à effet de serre dans le contexte du Protocole de Kyoto. Dans les pays où les pouvoirs publics continuent de choisir les technologies, ils pourraient choisir le nucléaire en raison de ces avantages, mais seulement aussi longtemps que ces derniers ne sont pas effacés par des dépenses d'investissement et des coûts de production trop lourds et par les risques qui en découlent.

Dépenses d'investissement et risques. Parmi les nouvelles centrales nucléaires, on distingue parfois les modèles évolutifs et les modèles révolutionnaires. Les premiers consistent en des modifications apportées aux modèles existants en vue d'améliorer la sûreté et l'efficacité économique. Les améliorations apportées aux modèles évolutifs résultent essentiellement d'un apprentissage pragmatique fondé sur l'expérience. Quoi qu'il en soit, les modèles évolutifs doivent apporter la preuve que les modifications apportées déboucheront sur des réacteurs commercialement compétitifs (le modèle, par exemple, peut ne pas être intéressant si la diminution de certaines dépenses d'investissement résulte d'une aug-

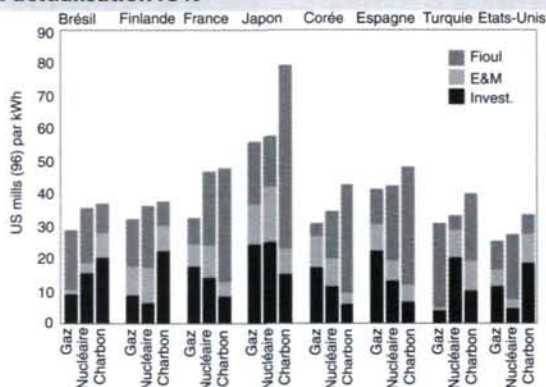
INCIDENCE D'UN DOUBLEMENT DES PRIX DU COMBUSTIBLE SUR LES COÛTS DE PRODUCTION



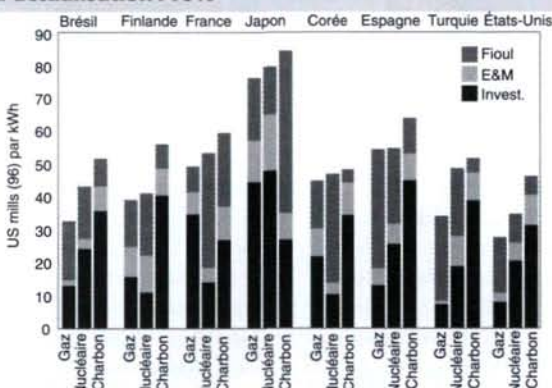
Note : Taux d'actualisation : 10% & horizon de planification : 25 ans.

COÛTS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ POUR CERTAINS PAYS

Taux d'actualisation : 5%



Taux d'actualisation : 10%



Source : OCDE

mentation de la taille de la centrale et, par conséquent, de dépenses d'investissement totales risquant d'excéder le seuil de risque fixé par les actionnaires).

Les modèles révolutionnaires – c'est-à-dire des modèles radicalement nouveaux sans

précédents commerciaux – offrent peut-être un plus grand avantage compétitif potentiel, principalement parce qu'ils peuvent être conçus explicitement pour satisfaire des marchés particuliers. En outre, ils présentent souvent des

caractéristiques de sûreté nettement améliorées.

Or, à l'exception de la mise au point du réacteur modulaire à lit de boulets en Afrique du Sud et du réacteur avancé à eau ordinaire aux États-Unis, aucun programme de conception d'un réacteur avancé ne s'est fixé, comme principal objectif, la réalisation d'un réacteur commercialement compétitif qui égalera et battra les prix du marché avec de meilleurs résultats en matière d'efficacité, de rendement et de performance.

La mise au point de la plupart des autres modèles de réacteur avancés, suscitée par l'accident survenu à Three Mile Island en 1979, place l'accent sur l'amélioration de la sûreté, ce qui représente un coût. Prenons l'exemple du réacteur Sizewell-B, au Royaume-Uni, l'un des plus onéreux construits à ce jour. On a estimé que jusqu'à 20% des dépenses d'investissement étaient imputables à "l'amélioration" de la sûreté de ce réacteur "amélioré".

Le niveau élevé des dépenses d'investissement, qui représentent quelque 70% des coûts de production estimatifs, est l'un des principaux obstacles au financement et à la construction de nouvelles centrales nucléaires. D'après les estimations actuelles, il faudrait réduire ces dépenses de 35% pour que les nouvelles centrales nucléaires puissent concurrencer les nouvelles centrales à charbon et à gaz. Pour réaliser ces économies, il faudrait adopter plusieurs stratégies, notamment réduire le coût de la mise en conformité aux règles de sûreté et lever, en matière de réglementation, les incertitudes liées aux responsabilités consécutives à l'exploitation.

Les incertitudes, les risques et les responsabilités sont économiquement importants car ils induisent un coût, parfois élevé, qui peut être réduit ou maîtrisé. Ils doivent tous être estimés et pris

en compte et sont aussi importants pour les investisseurs que le coût estimatif de production. Il sera donc tout aussi important d'atténuer les incertitudes financières que de réduire les coûts nominaux.

Les nouvelles centrales nucléaires présentent des risques financiers élevés qui ne sont pas nécessairement spécifiques à l'énergie nucléaire. Ces risques sont notamment les risques de non-achèvement, le risque réglementaire et politique, et les risques commerciaux liés à l'évolution des marchés. Les investisseurs vont exiger, pour compenser ces risques, un rendement élevé pour leur investissement. La grande question, pour les centrales nucléaires, est de savoir si les prix du marché leur permettront d'acquiescer de telles primes tout en dégageant des bénéfices.

Une sûreté rentable.

L'amélioration de la sûreté est un aspect important de la conception des nouvelles centrales nucléaires, et son coût sera déterminant dans toute décision d'investir ou non dans l'énergie nucléaire. L'amélioration de la rentabilité des investissements de sûreté peut donc faciliter le financement de nouvelles centrales. La part des dépenses de sûreté en pourcentage du coût total d'une nouvelle centrale nucléaire ne peut être déterminée avec précision, mais elle est importante : certaines estimations la situent entre 40% et 60%.

Plusieurs méthodes sont à l'étude pour réduire le coût de l'amélioration de la sûreté des nouveaux modèles de réacteur; nombre d'entre elles prévoient, au lieu de spécifier plusieurs normes et règles de performance, d'élaborer une norme sans conséquences importantes en dehors du site, même dans les pires scénarios d'accident. Ces méthodes sont notamment les suivantes :

- utilisation de systèmes de sûreté passive;

- réduction du nombre de composants et d'équipements soumis à des exigences de "qualité nucléaire" qui, pour certains composants, peuvent ajouter 200% au coût d'achat;

- orientation vers une réglementation de sûreté axée davantage sur l'information;

- prescription réglementaire d'objectifs plutôt que de moyens, ce qui permettrait une plus grande flexibilité dans la mise en conformité.

Au cours des 20 dernières années, de nouveaux objectifs et critères de sûreté ont été établis pour les centrales nucléaires sans se pencher véritablement sur les coûts et avantages économiques, ni sur des manières différentes – et peut-être plus rentables – d'atteindre les objectifs de sûreté. Cette attitude a été encouragée par le fait que la plupart des centrales nucléaires opéraient dans le cadre de monopoles où les coûts, qui pouvaient être incorporés dans les tarifs, n'étaient pas nécessairement une préoccupation essentielle. Or, les temps et la situation économique ont changé, et la réglementation doit s'adapter pour définir plus clairement quand une centrale est sûre et offrir, dans le même temps, une certaine flexibilité pour atteindre cet objectif.

Les risques de sûreté liés aux centrales nucléaires actuelles ont déjà été ramenés à des niveaux très faibles, tandis que les risques financiers liés à la construction de nouvelles centrales sont importants et vont en s'accroissant. Les investisseurs vont examiner minutieusement les nouvelles centrales et les nouveaux modèles du point de vue de leur rapport coût/bénéfice et de leur valeur nette actuelle. Or, utiliser ces éléments pour décider d'améliorations dont le coût – même le plus faible – peut rester très élevé semble disproportionné par rapport aux gains de sûreté

obtenus ou aux coûts liés aux risques à réduire, et risque de compromettre la viabilité économique et financière de la centrale. Pour une compagnie vendant de l'électricité dans un contexte commercial de plus en plus attentif aux coûts et concurrentiel, le coût net des mesures de sûreté est – comme tous les coûts de production – une préoccupation essentielle. Il est également déterminant dans le choix opéré, pour produire de l'électricité, entre les techniques nucléaires et non nucléaires.

Cette question de la diminution du rendement des investissements n'est pas spécifique à la sûreté nucléaire; elle caractérise en fait la plupart des normes de protection environnementale et sanitaire. S'agissant de la lutte contre la pollution de l'air, par exemple, le coût d'une réduction de 90 à 98% peut être tolérable, mais le coût de la réduction des 2% restants est exorbitant par rapport aux avantages obtenus. Il doit être clairement dit, par conséquent, qu'on ne mesure pas le niveau de sûreté d'une centrale à ses dépenses de sûreté. Ce qu'il faut, c'est réduire les dépenses de sûreté sans compromettre celle-ci, le but étant au contraire de l'améliorer.

Cette méthode ne définit pas de niveau de sûreté approprié mais exige de procéder à l'examen des conséquences économiques, à l'analyse financière des normes de sûreté proposées, et à l'analyse de fond des coûts et avantages liés à la sûreté.

Gestion des responsabilités en matière de déclassement et d'évacuation des déchets. Le deuxième obstacle principal à l'investissement dans de nouvelles centrales nucléaires a trait aux responsabilités consécutives à l'exploitation, c'est-à-dire aux coûts et risques liés au déclassement et à l'évacuation des déchets. Dans ce domaine, il faut étendre l'analyse, au-delà des coûts

techniques estimatifs et de leur financement, à la pratique de la gestion des responsabilités.

Les moyens permettant de mener à bien cette tâche existent. Des plans techniques et des devis de déclassement et d'évacuation des déchets ont été minutieusement mis au point et sont régulièrement actualisés, en premier lieu pour veiller à ce que des réserves suffisantes soient constituées pour couvrir le coût éventuel du déclassement et de l'évacuation des déchets. En outre, les normes concernant ces activités sont bien conçues.

Néanmoins, les devis actuels différeront certainement des dépenses finalement engagées, car les paramètres sur lesquels reposent ces devis évolueront sans doute. Ces paramètres sont, par exemple, la disponibilité des installations d'évacuation des déchets et les politiques régissant leur utilisation et la fermeture anticipée de centrales; l'évolution des normes de rayonnement applicables aux rejets de matières et aux sites; les règles ayant une incidence sur l'exploitation des centrales, le déclassement et l'évacuation des déchets; l'évolution des règles fiscales et comptables; les restructurations, les privatisations et l'intensification de la concurrence.

Étant donné les longs délais qu'impliquent le déclassement et l'évacuation des déchets, les compagnies auront généralement le temps de s'adapter à l'évolution de la situation, en supposant que les moyens et règles de gestion des risques soient en place et que les compagnies aient la possibilité de changer de stratégie en conséquence. Il ne fait aucun doute que les opérations de déclassement et d'évacuation des déchets peuvent être et seront réalisées. Les seules questions qui se posent ont trait à la chronologie, aux priorités, à l'efficacité et, partant, au coût des opérations, coût qui échappe, la

plupart du temps, au contrôle des administrateurs des centrales nucléaires. Or, le coût et l'efficacité du déclassement et de l'évacuation des déchets sont largement déterminés par des facteurs politiques. Le principal choix qui s'offre aux propriétaires et exploitants de centrales nucléaires a trait à la meilleure façon d'incorporer et de lever les incertitudes qui prévalent.

Ce qui importe, dès lors, c'est la façon dont les compagnies sont préparées à faire face aux changements imprévus. À cet égard, l'industrie nucléaire est généralement mal équipée. Elle n'examine pas de façon systématique, non plus, les incidences économiques des changements de réglementation. L'industrie et la société risquent, de ce fait, d'avoir à supporter des dépenses et des gaspillages importants, les risques financiers liés à ces opérations consécutives à la fermeture pouvant rapidement échapper à tout contrôle. Il faudrait s'attacher, en particulier, à gérer efficacement les coûts et à évaluer le coût de l'incertitude et des changements politiques et réglementaires.

Plus que de prévoyance, c'est de prudence dont il faut faire preuve : il faut prendre des mesures stratégiques et financières tenant compte des incertitudes politiques qui pèsent sur les obligations consécutives à l'exploitation. Une évaluation permanente des risques en fonction des résultats de la compagnie et l'adoption de clauses financières prudentes tenant compte de scénarios susceptibles d'avoir une incidence sur les actifs ou les recettes de la compagnie sont autant de stratégies standard de gestion des risques utilisées par les entreprises. Or, à quelques exceptions près, ces techniques ne sont pas systématiquement utilisées par les propriétaires de

centrales nucléaires et par les titulaires de licences d'exploitation.

La façon dont les risques et les coûts sont gérés déterminera, dans le temps, quelles techniques de production seront retenues ou éliminées, diffusées ou non, et choisies ou non pour les futures centrales. Les projets à coût élevé et à haut risque exigeront des rendements élevés. L'industrie nucléaire a-t-elle les moyens d'offrir les rémunérations exigées dans un contexte concurrentiel, ou peut-elle ramener les risques commerciaux et financiers encourus par les investisseurs à des niveaux raisonnables ? Il s'agit là d'objectifs évolutifs.

PRÉPARER LA VOIE

Quel est, dans ces conditions, l'avenir de l'énergie nucléaire ? On peut penser que les centrales existantes, lorsqu'elles sont rentables, continueront de prospérer. Il ne sera pas construit de nouvelles centrales si l'industrie nucléaire ne prend pas de mesures claires et fermes visant à modifier ses critères de conception, son orientation commerciale et son cadre réglementaire.

Il est vrai que le nucléaire présente de nombreux avantages sur le plan écologique, notamment pour ce qui est de réduire la pollution de l'air et les émissions de gaz à effet de serre, mais ces avantages ne suffisent pas en eux-mêmes à garantir son avenir. Ceux qui misent, pour un développement du nucléaire, sur le Protocole de Kyoto et ignorent toute réforme seront inévitablement déçus. Enfin, les responsables politiques doivent se pencher sur la question de l'évacuation des déchets et être disposés à laisser l'industrie nucléaire prouver qu'il existe des moyens permettant de gérer les déchets nucléaires. Il s'agit là d'un point essentiel si l'on veut convaincre le public de la sûreté de l'évacuation des déchets nucléaires en tant que procédé industriel. □

DE LA NÉCESSITÉ DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

UN POINT DE VUE SUR L'EXALTANT AVENIR ÉNERGÉTIQUE DE LA PLANÈTE

RICHARD RHODES ET DENIS BELLER

Le monde a besoin de plus d'énergie. L'énergie démultiplie la main d'œuvre, accroissant la productivité. Elle permet de construire et d'éclairer des écoles, de purifier l'eau, de faire fonctionner les machines agricoles, les machines à coudre et les robots d'assemblage, et de stocker et de transmettre des informations. La population mondiale ne cesse d'augmenter, ayant dépassé les six milliards d'individus en 1999. Or, un tiers d'entre eux – soit deux milliards – n'ont pas accès à l'électricité. Le développement dépend de l'énergie; l'absence de développement, c'est la souffrance, la pauvreté, la maladie et la mort. Ces problèmes sont une source d'instabilité et risquent de dégénérer en violence généralisée. C'est pourquoi les pays développés soucieux de leur sécurité nationale doivent aider leurs voisins en développement plus densément peuplés à accroître leur production d'énergie. Dans un souci tant de sûreté que de sécurité, cette offre accrue d'énergie devrait provenir de différentes sources.

"Au niveau mondial", estime la British Royal Society and Royal Academy of Engineering dans un rapport sur l'énergie nucléaire et les changements climatiques publié en 1999, "nous devrions voir notre consommation d'énergie au moins doubler dans les 50 prochaines années et jusqu'à quintupler au cours des 100 prochaines



années à mesure que la population mondiale augmentera et que les individus aspireront à améliorer leur niveau de vie". Même avec de

vigoureuses mesures d'économie d'énergie, la production mondiale d'énergie devrait tripler, d'ici à 2050, pour soutenir une consom-

M. Rhodes est l'auteur de The Making of the Atomic Bomb, Dark Sun et d'autres ouvrages. M. Beller est ingénieur nucléaire et technicien au Laboratoire national de Los Alamos (États-Unis). Le présent article s'inspire de l'essai publié par les auteurs dans Foreign Affairs, Vol. 70, N° 1 (Janvier/février 2000) et est publié ici avec la permission du New York Times Syndicate.

Photo : Entretien de lignes électriques en Indonésie (Crédit : PNUD).

mation équivalant à un tiers seulement de la consommation actuelle des États-Unis par habitant. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) prévoit, d'ici à 2020, une croissance de 65% de la demande mondiale d'énergie, deux tiers de cette demande émanant de pays en développement.

"Étant donné les futurs niveaux probables de consommation", avertit la Royal Society and Royal Academy, "il sera extrêmement difficile de satisfaire la demande mondiale d'énergie sans endommager durablement et dangereusement l'environnement". Parmi ces dommages, on peut citer la pollution des sols et de l'air, et le réchauffement planétaire.

UNE RUPTURE FRANCHE VERS L'AVENIR

Actuellement, dans le monde, l'énergie provient essentiellement du pétrole (39%), du charbon (24%), du gaz naturel (22%), de l'hydroélectricité (6,9%) et du nucléaire (6,3%). Même si le pétrole et le charbon continuent de dominer, leur part de marché décline depuis plusieurs décennies. Pendant ce temps, la part du gaz naturel et du nucléaire ne cesse d'augmenter, et cette augmentation devrait se poursuivre.

Contrairement aux affirmations des organisations antinucléaires, l'énergie nucléaire n'est ni morte ni mourante. La France produit environ 75% de son électricité grâce au nucléaire; la Belgique, 58%; la Suède, 47%; la Suisse, 36%; le Japon, 36%; l'Espagne, 31%; le Royaume-Uni, 29%; et les États-Unis (premier producteur mondial d'énergie nucléaire), 20%. La République de Corée et la Chine ont annoncé avoir conçu des plans ambitieux de développement de leur infrastructure nucléaire – la Corée en construisant 16 nouvelles centrales,

accroissant ainsi sa capacité de plus de 100%. Avec 433 réacteurs en service dans le monde, l'énergie nucléaire satisfait les besoins annuels en électricité de plus d'un milliard d'individus.

Aux États-Unis et dans le monde, la sûreté et le rendement du nucléaire se sont considérablement améliorés depuis 1990. En 1998, puis en 1999, le coefficient d'utilisation (pourcentage de la capacité d'une centrale que celle-ci produit) des réacteurs opérationnels a atteint des records. En 1999, le coefficient d'utilisation moyen était, aux États-Unis, de 85% pour environ 100 réacteurs, contre 58% en 1980 et 66% en 1990. Malgré la réduction du nombre de centrales, l'industrie nucléaire américaine a produit, en 1999, 9% d'électricité de plus qu'en 1998. Le coût moyen de production, pour l'énergie nucléaire, n'est actuellement que de 1,9 cent par kilowatt-heure (kWh), tandis que l'électricité produite à partir de gaz coûte 3,4 cents par kWh.

Rien qu'en améliorant sa capacité et sa performance, l'industrie nucléaire a été l'industrie américaine qui a le plus contribué à satisfaire l'engagement pris par les États-Unis, en vertu du Protocole de Kyoto, de limiter les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pendant ce temps, l'irradiation des travailleurs et les volumes de déchets produits par unité d'énergie ont été ramenés à des niveaux extrêmement faibles.

Les technologies importantes et complexes mettant plus d'un demi-siècle pour se propager dans le monde, le gaz naturel dominera, avec l'énergie nucléaire, la production d'énergie pendant les cent prochaines années. Reste à déterminer lequel des deux secteurs maîtrisera la plus grande part. Cependant, tous deux sont plus propres et plus sûrs que les combustibles qu'ils ont commencé à

remplacer, et leur progression devrait être soutenue.

Même les écologistes devraient se féliciter de cette transition et reconsidérer leur engouement pour les sources d'énergie renouvelables.

ÉNERGIE À BASE DE CARBONE

Parmi les sources de production d'électricité, le charbon est le pire polluant de l'environnement (le pétrole, qui est actuellement la principale source d'énergie, assure le fonctionnement des transports, ce qui le place dans une catégorie distincte). De récentes études réalisées par la Harvard School of Public Health font apparaître que les polluants émis par la combustion du charbon entraînent chaque année environ 15 000 décès prématurés aux seuls États-Unis. Utilisée pour produire environ un quart de l'énergie primaire mondiale, la combustion du charbon émet des quantités de déchets toxiques trop importantes pour pouvoir être maîtrisées en toute sûreté. Ces déchets sont soit dispersés directement dans l'air, soit solidifiés et mis en décharge. Certains sont même mélangés à des matériaux de construction.

Outre qu'elles émettent des substances chimiques nocives sous forme de gaz ou de particules toxiques – oxydes de soufre et d'azote (composants des pluies et brouillards acides), arsenic, mercure, cadmium, sélénium, plomb, bore, chrome, cuivre, fluor, molybdène, nickel, vanadium, zinc, monoxyde et dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre –, les centrales à charbon sont également, dans le monde, la principale source de rejets radioactifs dans l'environnement. De l'uranium et du thorium, éléments légèrement radioactifs omniprésents dans la croûte terrestre, s'échappent lors de la combustion du charbon. Du radon radioactif, produit par la

décomposition de l'uranium de la croûte terrestre et normalement confiné dans le sous-sol, s'échappe lors de l'extraction du charbon. Une centrale à charbon de 1000 mégawatts-électriques (MWe) émet 100 fois plus de radioactivité dans l'environnement qu'une centrale nucléaire de puissance comparable. Dans le monde, les rejets d'uranium et de thorium provenant de la combustion du charbon s'élèvent à environ 37 300 tonnes par an, dont environ 7300 tonnes imputables aux États-Unis. L'uranium et le thorium étant de puissants combustibles nucléaires, la combustion du charbon gaspille également plus d'énergie potentielle qu'elle n'en produit.

Les déchets radioactifs ignorés qui sont produits par la combustion du charbon mettent en évidence le contexte politique défavorable dans lequel opère l'industrie nucléaire. Les législations actuelles obligent les centrales nucléaires, à la différence des centrales à charbon, à investir dans des systèmes onéreux de réduction des rejets radioactifs. Aux États-Unis, le combustible nucléaire n'est pas efficacement recyclé en raison des craintes de prolifération. Ces facteurs ont perverti l'économie du développement nucléaire et créé un problème d'évacuation des déchets politiquement difficile à gérer. Si les centrales à charbon étaient contraintes d'engager les mêmes dépenses, l'électricité produite à partir de charbon ne serait pas plus économique que celle produite par le nucléaire.

ÉNERGIES RENOUVELABLES : DES RÉALITÉS CHANGEANTES

Les sources d'énergie renouvelables – hydroélectricité, énergies solaire, éolienne et géothermique, et biomasse – se caractérisent par des coûts d'investissement élevés et

ont sur l'environnement des répercussions importantes rarement admises officiellement. L'hydroélectricité n'est même pas une véritable source d'énergie renouvelable, car les barrages finissent par s'envaser. La plupart des sources d'énergie renouvelables captent une énergie extrêmement diluée qui, pour être concentrée, nécessite de vastes terrains et d'un grand nombre de capteurs. La fabrication des capteurs solaires, le béton utilisé pour fixer les éoliennes et la submersion de nombreux hectares de terres en amont des barrages endommagent et polluent l'environnement.

Les cellules photovoltaïques utilisées pour capter les rayonnements solaires sont de vastes semi-conducteurs; leur fabrication produit des déchets toxiques (métaux et solvants) dont l'évacuation nécessite des technologies spéciales. Une centrale électrique solaire de 1000 MWe produirait, du fait du seul traitement des métaux, 6850 tonnes de déchets dangereux sur une durée de vie de 30 ans. Une centrale thermique solaire comparable (utilisant des miroirs orientés vers une tour centrale) nécessiterait, pour sa construction, des métaux qui produiraient 435 000 tonnes de résidus, dont 16 300 tonnes seraient contaminés par le plomb et le chrome et seraient jugés dangereux.

Un système énergétique solaire mondial consommerait au moins 20% des ressources en fer connues de la planète. Il faudrait un siècle pour le construire et son entretien nécessiterait une proportion considérable de la production annuelle mondiale de fer. L'énergie nécessaire pour fabriquer suffisamment de capteurs solaires pour couvrir 1 300 000 km² de surface terrestre et acheminer l'électricité par des lignes à longue distance aggraverait considérablement, à elle seule, la pollution et les émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Un

système énergétique solaire mondial non secondé par des centrales à combustible fossile ou nucléaires serait par ailleurs dangereusement vulnérable aux diminutions de rayonnements solaires dues à des phénomènes volcaniques tels que l'éruption survenue à Tambora en 1815, qui a rejeté dans l'atmosphère 40 kilomètres cubes de cendres. Ces cendres ont considérablement réduit les rayonnements solaires pendant plusieurs années, ce qui s'est traduit par une mauvaise récolte généralisée pendant "l'année sans été" qui a suivi.

Les fermes éoliennes, outre qu'elles nécessitent des milliers de tonnes de béton et d'acier pour leur construction (d'où d'énormes quantités de résidus), sont inefficaces en raison de leur faible (car intermittent) rendement. Elles entraînent également une pollution visuelle et sonore et sont un véritable fléau pour les oiseaux. Plusieurs centaines d'oiseaux de proie, dont des dizaines d'aigles royaux, sont tués chaque année par chaque ferme éolienne de Californie; davantage d'aigles ont été tués par des turbines éoliennes que par la marée noire catastrophique de l'Exxon Valdez. La National Audubon Society a lancé une campagne visant à sauver le condor californien d'un projet de ferme éolienne devant être construite au nord de Los Angeles. Une ferme éolienne équivalente en production et en puissance à une centrale à combustible fossile ou nucléaire de 1000 MWe nécessiterait l'installation de plus de 4000 grandes éoliennes et occuperait entre plusieurs centaines et un millier de kilomètres carrés de terrain. En outre, même en bénéficiant d'importantes subventions et en ignorant le coût caché de la pollution, elle produirait de l'électricité à un coût double ou triple de celui de l'électricité d'origine fossile.

Bien qu'au moins un quart du potentiel hydroélectrique mondial

ait déjà été exploité, l'énergie hydroélectrique – produite par des barrages qui submergent de vastes terres, déplacent des populations rurales, modifient l'écologie des rivières, tuent les poissons et risquent un effondrement catastrophique – a, on le comprend, perdu ces dernières années le soutien des écologistes. La Banque américaine de financement du commerce extérieur a cédé en partie aux pressions écologistes lorsqu'elle a refusé de financer le projet chinois de barrage des Trois-Gorges, d'une puissance prévue de 18 000 MWe. La production d'énergie hydroélectrique peut en effet émettre davantage de gaz à effet de serre dans l'atmosphère que l'utilisation de combustibles fossiles, car elle entraîne une décomposition anaérobie de la végétation submergée dans l'eau retenue par les nombreux barrages, et le rejet d'importantes quantités de méthane, gaz à effet de serre plus nocif que le dioxyde de carbone.

Quant aux sources géothermiques – qui exploitent la chaleur interne de la Terre émergeant dans les régions de geysers ou sous les volcans –, elles sont intrinsèquement limitées et coïncident souvent avec des sites pittoresques (tel le parc national de Yellowstone, aux États-Unis), que les défenseurs des ressources naturelles souhaitent à juste titre protéger.

En raison de ces inconvénients, notamment, des organisations telles que le Conseil mondial de l'énergie et l'AIE prédisent que la production d'hydroélectricité ne représentera jamais plus de 6,9% (sa part actuelle) de l'offre d'énergie primaire mondiale, tandis que les autres sources d'énergie renouvelables, même fortement subventionnées, verront leur part actuelle de 0,5% passer tout au plus à 5-8% d'ici à 2020. Aux États-Unis, qui dominent la production mondiale d'électricité

provenant de sources renouvelables, cette production a en fait chuté de 9,4% entre 1997 et 1998 – l'hydroélectricité de 9,2%, l'énergie géothermique de 5,4%, l'énergie éolienne de 50,5% et l'énergie solaire de 27,7%.

Tout comme le rêve d'une fusion thermonucléaire maîtrisée, la réalité d'un monde fonctionnant grâce à une énergie propre émanant de sources renouvelables continue de s'estomper, et ce malgré des activités de recherche-développement coûteuses et fortement subventionnées. En 1997, l'investissement en recherche-développement, aux États-Unis, n'a été que de 5 cents par millier de kWh pour le nucléaire et le charbon, 58 cents pour le pétrole et 41 cents pour le gaz, contre plus de 4700 dollars pour l'énergie éolienne et 17 000 dollars pour la photovoltaïque. Cet investissement public massif dans les sources d'énergie renouvelables aurait été mieux dépensé à rendre les centrales à charbon et les automobiles plus propres.

D'après Robert Bradley, du Houston's Institute for Energy Research, les activités d'économie d'énergie et de mise en valeur des sources renouvelables non hydroélectriques ont bénéficié, sur 20 ans, d'un investissement cumulé de 30 à 40 milliards de dollars, soit "l'investissement énergétique public le plus important en temps de paix de l'histoire des États-Unis". En outre, Bradley estime que "les 5,8 milliards de dollars consacrés par le Département de l'énergie au subventionnement des énergies éolienne et solaire" auraient pu, à eux seuls, financer "le remplacement par des turbines à gaz à cycle combiné de 5000 à 10 000 MWe de capacité extrêmement polluante produite à l'aide de charbon, ce qui aurait réduit les émissions de dioxyde de carbone d'un à deux tiers". En remplaçant le charbon par le nucléaire, on aurait pu réduire encore davantage les émissions globales.

Malgré les investissements massifs, les activités d'économie d'énergie et de mise en valeur des sources renouvelables non hydroélectriques s'obstinent à ne pas être compétitives et ne contribuent que de façon marginale à l'offre d'énergie aux États-Unis. Si le pays le plus prospère du monde ne peut s'offrir ce luxe, qui peut ? Pas la Chine, évidemment, qui compte produire, en 2025, moins de 1% de son énergie commerciale à partir de sources d'énergie renouvelables non hydroélectriques. Cette année-là, le charbon et le pétrole continueront de former l'essentiel de l'offre énergétique chinoise, à moins que les pays développés n'incitent le pays le plus peuplé du monde à modifier ses plans.

COMPARER LES CHOIX

Le gaz naturel présente, comme combustible, de nombreuses qualités par rapport au charbon ou au pétrole, et sa part dans la production mondiale d'électricité va certainement croître pendant la première moitié du XXI^e siècle. Cependant, son offre est limitée et inégalement répartie; il est plus onéreux, comme source d'électricité, que le charbon ou l'uranium; et il pollue l'air. Une centrale au gaz naturel de 1000 MWe rejette, par jour, 5,5 tonnes d'oxydes de soufre, 21 tonnes d'oxydes d'azote, 1,6 tonne de monoxyde de carbone, et 0,9 tonne de matières sous forme de particules. Aux États-Unis, en 1994, la production d'électricité à partir de gaz naturel a généré environ 5,5 milliards de tonnes de déchets. Les incendies et les explosions dues au gaz naturel présentent également un risque important. Un kilomètre de gazoduc d'un mètre de diamètre soumis à une pression de 1000 livres par pouce carré (psi) contient l'équivalent de 660 tonnes d'énergie explosive; près de deux millions de

kilomètres de gazoducs de ce type entourent la Terre.

Le grand avantage de l'énergie nucléaire est son aptitude à extraire d'énormes quantités d'énergie d'un faible volume de combustible. La fission nucléaire, qui transforme la matière directement en énergie, est plusieurs millions de fois plus énergétique que la combustion chimique, qui ne fait que rompre les liens chimiques. Une tonne de combustible nucléaire produit une énergie équivalant à 2 à 3 millions de tonnes de combustible fossile. La combustion d'un kilogramme de bois de chauffe peut produire 1 kilowatt-heure d'électricité; 1 kg de charbon, 3 kWh; 1 kg de pétrole, 4 kWh. Par contre, 1 kg d'uranium, dans un réacteur moderne à eau ordinaire, produit 400 000 kWh d'électricité et, si cet uranium est recyclé, plus de 7 millions de kWh. Ces différences spectaculaires de volume aident à mieux comprendre l'énorme différence d'impact environnemental qui existe entre le nucléaire et les combustibles fossiles. L'exploitation d'une centrale électrique de 1000 MWe pendant un an nécessite 2000 wagons de charbon ou 10 superpétroliers, mais seulement 12 mètres cubes d'uranium naturel. De l'autre extrémité des centrales à combustible fossile, même celles équipées de dispositifs antipollution, s'échappent des milliers de tonnes de gaz nocifs, de particules et de cendres contenant des métaux lourds (et radioactifs), sans parler des dangereux déchets solides –

**Aujourd'hui, l'uranium est raffiné et transformé en combustible en utilisant l'énergie du charbon, ce qui bien entendu produit des polluants. Si l'énergie nucléaire pouvait être utilisée pour produire de la chaleur industrielle ou si les ensembles de combustible étaient recyclés, cette source de pollution serait éliminée ou fortement réduite.*

jusqu'à 500 000 tonnes de soufre provenant du charbon, plus de 300 000 tonnes provenant du pétrole, et 200 000 tonnes provenant du gaz naturel.

Par comparaison, une centrale nucléaire de 1000 MWe n'émet aucun gaz nocif ni aucun autre polluant*, et une radioactivité par habitant nettement inférieure à celle produite par un voyage en avion, un détecteur de fumée domestique ou un poste de télévision. Elle produit environ 30 tonnes de déchets de haute activité (combustible irradié) et 800 tonnes de déchets de faible à moyenne activité – environ 20 mètres cubes en tout après compactage (en gros, le volume de deux automobiles). Toutes les centrales nucléaires en activité dans le monde produisent chaque année quelque 3000 mètres cubes de déchets. Par comparaison, l'industrie américaine produit chaque année environ 50 millions de mètres cubes de déchets solides toxiques.

Les déchets de haute activité sont, bien entendu, extrêmement radioactifs (les déchets de faible activité peuvent être moins radioactifs que la cendre de charbon utilisée pour fabriquer du béton ou du gypse, qui sont tous deux présents dans les matériaux de construction). Grâce à leur faible volume, cependant, et au fait qu'ils ne sont pas libérés dans l'environnement, ces déchets de haute activité peuvent être soigneusement confinés derrière de multiples barrières. Les déchets du charbon, dispersés dans la nature sous forme de fumée ou enfouis à faible profondeur, demeurent à jamais toxiques. Les déchets nucléaires radioactifs décroissent progressivement, perdant 99% de leur toxicité après 600 ans – délai tout à fait conforme aux limites de l'expérience humaine en matière de protection et d'entretien, comme en témoignent des

structures telles que le Panthéon de Rome et Notre-Dame de Paris.

Aux États-Unis, l'évacuation des déchets nucléaires pose un problème politique en raison de craintes généralisées sans commune mesure avec la réalité des risques. Ce n'est cependant pas un problème technique, comme le montrent des projets perfectionnés élaborés en France, en Suède et au Japon. L'Organisation mondiale de la santé a estimé que la pollution de l'air intérieur et extérieur cause chaque année quelque 3 millions de décès. En remplaçant de vastes quantités dispersées de déchets toxiques provenant de combustibles fossiles par de faibles volumes de déchets nucléaires correctement confinés, on obtiendrait une telle amélioration de la santé publique qu'il est étonnant que les médecins n'aient pas déjà exigé une telle conversion.

Le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire produite par les centrales américaines existantes est déjà pleinement compétitif par rapport à celui de l'électricité produite au moyen de combustibles fossiles, même si l'électricité d'origine nucléaire produite récemment est un peu plus onéreuse. Cependant, ce prix plus élevé est trompeur. En effet, les grandes centrales nucléaires exigent des investissements plus importants que les centrales comparables à charbon et à gaz, uniquement parce que les exploitants nucléaires sont contraints de construire et de maintenir des systèmes coûteux de protection de l'environnement contre les rayonnements.

Si les centrales à combustibles fossiles étaient également tenues de confiner les polluants qu'elles produisent, elles coûteraient nettement plus que les centrales nucléaires. L'Union européenne et l'AIEA ont déterminé que "pour des quantités équivalentes d'énergie produite, les centrales à charbon et à pétrole, ... en raison de leurs émissions importantes et de

leurs énormes besoins en combustible et en moyens de transport, présentent les coûts externes les plus élevés et se soldent par un nombre équivalent de vies perdues. Les coûts externes sont environ dix fois plus élevés que pour une centrale nucléaire et peuvent représenter une partie non négligeable des coûts de production". En équivalent de vies perdues par gigawatt produit (perte d'espérance de vie due à l'exposition à des polluants), le charbon tue 37 personnes par an; le pétrole, 32; le gaz, 2; et le nucléaire, 1. Contrairement à l'énergie nucléaire, autrement dit, les combustibles fossiles (et les sources d'énergie renouvelables) ont bénéficié de la gratuité en matière aussi bien de protection de l'environnement que de santé et de sûreté publiques.

Même l'estimation d'une vie perdue du fait de l'énergie nucléaire est discutable. Une telle estimation dépend du fait de savoir si oui ou non, comme le prétend la vieille théorie du "non-seuil linéaire" (NSL), l'exposition à des doses de rayonnement nettement inférieures aux niveaux naturels préexistants accroît le risque de cancer. Cette théorie impose, pour l'exploitation des centrales nucléaires et l'évacuation des déchets qui en découlent, des systèmes perfectionnés et coûteux de confinement alors qu'il n'existe aucune preuve que l'exposition à des rayonnements de faible activité accroît le risque de cancer. En fait, il est prouvé que ce n'est pas le cas. Il est même prouvé que l'exposition à de faibles doses de radioactivité améliore la santé et allonge la durée de vie, probablement en stimulant, à l'instar des vaccins, le système immunitaire (la meilleure étude réalisée à ce sujet, qui portait sur les niveaux naturels de radon relevés dans des centaines de milliers de foyers de plus de 90% des comtés américains, a mis en évidence tant chez les fumeurs

que chez les non-fumeurs une nette diminution des taux de cancer du poumon à mesure qu'augmentaient les niveaux de radon). La faible radioactivité provenant des centrales nucléaires présente donc, dans le pire des cas, un risque négligeable. Les spécialistes de l'extraction et de la transformation du charbon avancent le même argument concernant la faible radioactivité provenant de sa combustion; une enquête réalisée par les services géologiques américains a conclu, par exemple, que "les éléments radioactifs présents dans le charbon et les cendres volantes ne devraient pas inquiéter". Or, le développement de l'énergie nucléaire a été entravé, et l'évacuation des déchets nucléaires inutilement retardée, par des limites non infligées à l'industrie du charbon.

Aucune technologie n'est à l'abri d'accidents. Récemment, des débordements et des ruptures de barrages en Italie et en Inde ont causé chacun plusieurs milliers de morts. Les accidents survenant dans les mines de charbon, les incendies de centrales à charbon et à gaz et les explosions de gazoducs tuent généralement des centaines de personnes par accident. La catastrophe de l'usine chimique de Bhopal, en 1984, a entraîné 3000 décès immédiats et intoxiqué plusieurs centaines de milliers de personnes. D'après l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis, il s'est produit aux États-Unis, entre 1987 et 1996, plus de 600 000 rejets accidentels de produits chimiques toxiques qui ont tué au total 2565 personnes et en ont blessé 22 949.

En comparaison, les accidents nucléaires ont été rares et bénins. L'accident récent survenu au Japon, dont on a beaucoup parlé, n'a pas eu lieu dans une centrale nucléaire mais dans une installation de traitement du combustible destiné à un réacteur de recherche. Il n'a causé, dans le public, ni décès ni blessure. Quant à l'explo-

sion de Tchernobyl, elle a résulté d'une erreur humaine liée à l'exploitation d'un modèle de réacteur fondamentalement défectueux qui n'aurait jamais reçu d'autorisation à l'Ouest. Il a causé d'importants dommages humains et écologiques à l'échelon local, y compris 31 décès, la plupart par irradiation. L'incidence des cancers de la thyroïde, qui auraient pu être prévenus par une rapide prophylaxie à l'iode, a augmenté chez les enfants ukrainiens exposés aux retombées. Plus de 800 cas ont été diagnostiqués et l'on en prévoit plusieurs milliers d'autres; bien que la maladie soit curable, trois enfants sont décédés. Les calculs fondés sur le modèle NSL laissent prévoir 3420 décès par cancer chez les habitants de la région de Tchernobyl et chez les nettoyeurs. Le réacteur de Tchernobyl ne disposait d'aucune structure de confinement, système fondamental de sûreté qui est exigé sur les réacteurs occidentaux. Les calculs réalisés après l'accident montrent qu'une telle structure aurait confiné l'explosion et, partant, la radioactivité, ce qui aurait évité toute blessure ou tout décès.

Ces chiffres, s'agissant du pire accident nucléaire jamais survenu, sont remarquablement faibles comparés aux plus graves accidents survenus dans d'autres industries. Plus de 40 ans d'exploitation commerciale de l'énergie nucléaire ont montré que cette dernière est bien plus sûre que les systèmes à combustibles fossiles pour ce qui est des accidents industriels, des dommages causés à l'environnement, des effets sur la santé et des risques à long terme.

RÉÉVALUER LE RECYCLAGE

La plupart de l'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires est inerte. C'est un produit non fissile inutilisable à des fins d'armement. Les réacteurs en exploitation, cependant, produisent du pluto-

nium fissile susceptible d'être utilisé dans des bombes. C'est pourquoi la commercialisation de l'énergie nucléaire suscite des craintes de prolifération des armements. En 1977, le président Carter a reporté indéfiniment le recyclage du combustible nucléaire "irradié", évoquant des risques de prolifération. Cette décision a effectivement mis fin au recyclage nucléaire aux États-Unis, alors que ce recyclage réduit le volume et la radiotoxicité des déchets nucléaires et pourrait porter les réserves de combustible nucléaire à plusieurs milliers d'années. D'autres pays ont évalué les risques différemment et la majorité d'entre eux n'ont pas suivi l'exemple américain. La France et le Royaume-Uni recyclent actuellement le combustible irradié; la Russie stocke le combustible et le plutonium séparé pour démarrer de futurs réacteurs rapides; le Japon a commencé à utiliser l'uranium recyclé et le combustible à oxydes mixtes (MOX) dans ses réacteurs et a récemment approuvé la construction d'une nouvelle centrale nucléaire devant utiliser 100% de MOX d'ici à 2007.

Bien que le plutonium provenant des réacteurs puisse théoriquement être utilisé pour fabriquer des explosifs nucléaires, le combustible nucléaire est réfractaire, hautement radioactif et impossible, pour des terroristes, à transformer. Les armes fabriquées à partir de plutonium provenant de centrales seraient fortement radioactives, instables et de rendement incertain. L'Inde a extrait du plutonium de qualité armement d'un réacteur à eau ordinaire canadien et interdit l'inspection de certains réacteurs polyvalents qu'elle a construits. Toutefois, aucun plutonium n'a jamais été détourné d'installations de recyclage britanniques ou françaises et aucun combustible détourné à des fins d'armement; les inspections de l'AIEA préviennent efficacement

de tels détournements. Le risque de prolifération, selon l'AIEA, "n'est pas nul et ne deviendrait pas nul même si l'énergie nucléaire cessait d'exister. Ce n'est qu'en renforçant continuellement le régime de non-prolifération qu'on pourra prévenir la prolifération des armes nucléaires".

L'ironie, c'est qu'en enfouissant le combustible irradié sans extraire son plutonium par recyclage, on augmenterait en fait le risque à long terme de prolifération nucléaire, car la décroissance, en un à trois siècles, d'isotopes moins fissiles et plus radioactifs dans le combustible irradié améliore les qualités explosives du plutonium qu'il contient, le rendant plus intéressant pour la production d'armes. Outre qu'il étendrait presque indéfiniment les ressources mondiales en uranium, le recyclage permettrait de convertir le plutonium en énergie utile tout en le décomposant en déchets nucléaires de plus courte période, non fissiles et inoffensifs.

Des centaines de tonnes de plutonium de qualité armement, qui coûtent aux superpuissances nucléaires des milliards de dollars à produire, se sont transformés, au cours de la décennie écoulée, en surplus militaires. Plutôt que d'enfouir – comme l'a proposé Washington – une partie de ce matériau stratégiquement inquiétant mais précieux sur le plan énergétique, mieux vaudrait le recycler en combustible nucléaire. Un système international chargé de recycler et de gérer ce combustible empêcherait toute prolifération clandestine. Comme l'imaginent Edward Arthur, Paul Cunningham et Richard Wagner du Laboratoire national de Los Alamos, un tel système combinerait un stockage accessible sous surveillance internationale, la transformation de tout le plutonium séparé en MOX destiné aux réacteurs de puissance et, à plus long terme, des réacteurs intégrés

modernes de transformation des matériaux qui recevraient, contrôleraient et transformeraient tout le combustible rejeté par les réacteurs de la planète, produisant ainsi de l'électricité et réduisant le combustible irradié en déchets nucléaires de courte période prêts pour un stockage permanent dans les formations géologiques.

L'ÉTAPE SUIVANTE

Une nouvelle génération de petites centrales électriques modulaires – compétitives par rapport au gaz naturel et conçues pour être sûres, anti-proliférantes et faciles à exploiter – sera nécessaire pour étendre les avantages de l'énergie nucléaire à des pays en développement plus petits qui ne disposent pas d'infrastructure nucléaire. Le Département de l'énergie a financé trois modèles de centrale de ce type, dites de "quatrième génération". Une compagnie sud-africaine, Eskom, a annoncé son intention de commercialiser un réacteur modulaire à lit de boulets refroidi au gaz qui ne nécessite aucun circuit de refroidissement d'urgence du cœur et ne peut, physiquement, "fondre". Eskom estime que ce réacteur produira de l'électricité pour un coût de 1,5 cent par kWh, ce qui est inférieur au coût de l'électricité produite par une centrale à gaz à cycle combiné. Le Massachusetts Institute of Technology et l'Idaho National Engineering and Environmental Laboratory mettent actuellement au point un modèle analogue destiné à fournir de hautes températures utilisées dans des procédés industriels tels que la production d'hydrogène et le dessalement.

Le pétrole est aujourd'hui utilisé principalement pour les transports, mais le moteur à combustion interne a atteint ses limites de perfectionnement. Toute poursuite de la réduction de la pollution due aux transports



passera obligatoirement par l'abandon du pétrole et par la mise au point, pour les automobiles et les poids lourds, de systèmes énergétiques non polluants. En rechargeant les batteries de voitures électriques, on ne fait que transférer la pollution de sources mobiles vers des sources centralisées, à moins que la source centralisée d'électricité soit nucléaire. Les piles à combustible, qui sont en voie de commercialisation, peuvent représenter une meilleure solution. Comme elles produisent de l'électricité directement à partir de combustibles gazeux ou liquides, elles peuvent être rechargées en route, un peu comme les moteurs à combustion interne actuels. Lorsqu'elles fonctionnent à l'hydrogène pur, les piles ne produisent, comme déchet, que de l'eau. Comme l'hydrogène peut être produit à partir d'eau en utilisant de la chaleur ou de l'électricité, on peut envisager une infrastructure énergétique très peu polluante qui utiliserait l'hydrogène produit par l'énergie nucléaire pour les transports, l'électricité d'origine nucléaire et la chaleur industrielle pour la plupart des autres applications, et le gaz naturel et les sources d'énergie

renouvelables comme solution de secours.

Un tel engagement en faveur de l'énergie nucléaire pourrait non seulement enrayer, mais également inverser l'accumulation continue de carbone dans l'atmosphère. Entre-temps, des piles à combustible utilisant du gaz naturel pourraient considérablement réduire la pollution de l'air.

ALIMENTER L'AVENIR

Pour répondre aux besoins croissants de la planète en énergie, le rapport de la Royal Society and Royal Academy préconise "la création d'un organe international chargé de la recherche-développement énergétique, financé par les contributions des pays sur la base de leur PIB ou de leur consommation totale d'énergie". Cet organe serait "un organisme de financement soutenant, ailleurs, la recherche, le développement et la mise en œuvre de projets de démonstration, pas un centre de recherche à proprement parler". Son budget annuel pourrait s'élever à quelque 25 milliards de dollars, "soit environ 1% du budget énergétique mondial". Pour véritablement développer une offre d'énergie rationnelle et responsable, un tel organe devrait se concentrer sur l'option nucléaire, mettre sur pied un système international de stockage et de recyclage du combustible nucléaire, et

offrir des services spécialisés dans l'implantation, le financement et l'homologation de centrales nucléaires modulaires destinées aux pays en développement.

Selon Arnulf Gruebler, Nebojsa Nakicenovic et David Victor, qui étudient la dynamique des techniques énergétiques, "la part de l'énergie fournie par l'électricité croît rapidement dans la plupart des pays et dans le monde". Tout au long de l'histoire, l'humanité a progressivement décarbonisé ses principaux combustibles, abandonnant régulièrement les sources les plus polluantes riches en carbone. Le monde est ainsi passé du charbon (qui compte un atome d'hydrogène par atome de carbone et a dominé de 1880 à 1950) au pétrole (qui compte deux atomes d'hydrogène par atome de carbone, et qui a dominé de 1950 à ce jour). Le gaz naturel (quatre atomes d'hydrogène par atome de carbone) voit sa part de marché croître constamment. La fission nucléaire, cependant, ne produit pas du tout de carbone.

C'est la réalité physique – et non des arguments concernant l'avidité des sociétés, les risques hypothétiques, l'exposition aux rayonnements ou l'évacuation des déchets – qui devrait renseigner les décisions cruciales pour l'avenir de la planète. La diversité et la redondance étant nécessaires à la sûreté et à la sécurité, les sources d'énergie renouvelables devraient conserver, pendant le siècle à venir, une place dans l'offre d'énergie. L'énergie nucléaire, quant à elle, devrait jouer un rôle essentiel. Malgré son bilan exceptionnel, elle a été reléguée par ses opposants dans la même zone d'ombre et de controverse idéologique que l'avortement et l'évolution. Elle mérite mieux. L'énergie nucléaire est écologiquement sûre, pratique et économique. Loin d'être le problème, elle est l'une des meilleures solutions. □

Photo : La centrale nucléaire de Forsmark (Suède). Crédit : Göran Hansson

AMÉLIORATION DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET DU CYCLE DU COMBUSTIBLE DE NÉCESSAIRES INNOVATIONS

D. MAJUMDAR, J. KUPITZ, H. ROGNER, T. SHEA, F. NIEHAUS ET K. FUKUDA

A mesure que le siècle s'écoule, il apparaît certain que le développement mondial et la croissance démographique vont mettre à l'épreuve l'habitabilité de la planète. On prend de plus en plus conscience, en particulier, de l'urgence qu'il y a à satisfaire les besoins croissants en électricité et en eau d'une manière qui respecte l'environnement.

Au cours des 50 dernières années, l'énergie nucléaire s'est transformée d'une nouveauté scientifique en l'une des plus importantes formes d'énergie utilisées dans plus de 30 pays. En 1999, dix-sept pays utilisaient l'énergie nucléaire pour satisfaire au moins 25% de leurs besoins en électricité. Dans le même temps, davantage de pays souhaitent développer et démontrer diverses applications de l'énergie nucléaire telles que l'utilisation de réacteurs pour le dessalement de l'eau de mer.

Dans ce contexte, on pourrait s'attendre à constater une augmentation de la production d'électricité d'origine nucléaire. Or, ce n'est pas le cas, et la future contribution de l'électronucléaire à la résolution des problèmes posés par la recherche d'un développement énergétique durable est incertaine. Dans le monde, le tableau est mitigé : aucune nouvelle centrale nucléaire n'est en construction en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Dans plusieurs pays d'Asie et dans

certaines régions d'Europe orientale, cependant, l'énergie nucléaire continue de se développer.

Les principaux facteurs qui expliquent ce tableau mitigé sont les inquiétudes et les perceptions erronées qui se font jour dans trois domaines :

- la sûreté et la sécurité;
- le lien qui existe entre l'énergie nucléaire et les armes nucléaires;
- les aspects environnementaux et économiques de l'énergie nucléaire et de son cycle du combustible.

Si l'on veut que l'énergie nucléaire contribue de façon significative à la satisfaction de la future demande d'énergie, il faut lever ces inquiétudes.

Concrètement, l'acceptation du nucléaire comme future source d'énergie dépendra de la façon dont auront été résolus les problèmes rencontrés pendant le déploiement du nucléaire au XX^e siècle.

Chaque problème peut être abordé en agissant dans trois domaines étroitement liés.

- **Technologie.** Les caractéristiques de la technologie

proprement dite influent dans une mesure appréciable sur certains aspects essentiels de la sûreté et de la sécurité; sur la non-prolifération; et sur les facteurs environnementaux et économiques.

- **Cadre juridique et institutionnel.** Les contrats commerciaux, les législations et réglementations nationales ainsi que les traités et conventions intergouvernementaux fixent les règles de base qui conditionnent le développement et la mise en œuvre du nucléaire.

- **Surveillance et contrôle.** Les contrôles effectués par les propriétaires et exploitants d'installations nucléaires, par les autorités locales et nationales, par les organisations régionales et internationales et par les associations de citoyens ont pour objet de veiller à ce que la structure nécessaire de surveillance des opérations nucléaires soit en place et maintenue.

Dans chacun de ces trois domaines étroitement liés, diverses activités ont été et sont mises en œuvre; en fait, le demi-siècle écoulé a produit une

M. Majumdar, expert américain, travaille à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA, section que dirige M. Rogner. M. Kupitz dirige la Section du développement de la technologie électronucléaire, et M. Fukuda la Section du cycle du combustible nucléaire et des matières nucléaires de ce Département. M. Shea dirige le Bureau de l'Initiative trilatérale au Département des garanties de l'AIEA. M. Niehaus dirige la Section de l'évaluation de la sûreté au Département de la sûreté nucléaire de l'AIEA.

industrie qui a exploité l'énergie nucléaire avec un tel succès qu'elle satisfait actuellement un sixième des besoins mondiaux en électricité. Ce résultat vaut d'être mentionné.

Toutefois, les problèmes rencontrés aujourd'hui diffèrent de ceux rencontrés au cours des décennies écoulées et varient considérablement d'une région à l'autre de la planète. Ils sont particulièrement aigus dans les pays en développement, qui ont besoin d'électricité pour lutter contre la pauvreté et satisfaire les besoins fondamentaux liés à un développement durable. Il faut davantage aider les pays en développement qui souhaitent utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité.

Très peu des moyens dont on dispose pour résoudre les problèmes inhérents à chacun de ces trois domaines peuvent être améliorés de façon simple ou rapide. Ces améliorations exigeront des efforts soutenus et très longs et nécessiteront de rechercher, en coopération, des solutions innovantes permettant de résoudre les principales questions, inquiétudes et conceptions erronées.

Étant donné la situation énergétique qui prévaut dans le monde et les exigences du développement durable, l'un des principaux objectifs doit être de renforcer les bases d'un accroissement de la contribution potentielle du nucléaire à l'offre d'électricité. De telles mesures peuvent être prises dans le cadre de programmes cohérents visant, pour obtenir le soutien du public et des responsables politiques, les aspects techniques, juridiques, institutionnels et réglementaires nécessaires.

Depuis qu'elle existe, l'AIEA joue un rôle moteur dans l'établissement et la coordination d'activités internationales soutenant les

applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Alors que le nucléaire atteint un stade décisif de son développement, les activités de l'Agence dans des domaines tels que l'énergie nucléaire et le cycle du combustible revêtent une importance accrue. Le présent article examine la situation mondiale dans le contexte des grands problèmes qui se posent et s'interroge sur la nécessité d'une action coordonnée et durable indispensable pour progresser, à l'aube du siècle nouveau, dans le développement de l'énergie nucléaire. À l'heure où le marché mondial de l'énergie se développe, l'énergie nucléaire a la possibilité d'accroître sa contribution à la production d'électricité ainsi qu'à diverses applications finales non électriques de l'énergie, et ce dans différents domaines.

LA SITUATION MONDIALE

La contribution de l'énergie nucléaire à la future offre d'énergie dépend de plusieurs facteurs clés. Le degré d'engagement, au niveau mondial, en faveur de stratégies énergétiques durables et la reconnaissance du rôle du nucléaire dans de telles stratégies influenceront sur sa future utilisation. La maturité technologique, la compétitivité économique, les mécanismes financiers et l'acceptation par le public sont d'autres facteurs clés qui influenceront sur la décision de construire de nouvelles centrales. La perception des choix énergétiques et des problèmes environnementaux par le public ainsi que l'information et l'éducation de celui-ci joueront également un rôle important. Il faut aussi veiller constamment à la sûreté d'exploitation des centrales existantes si l'on veut que le nucléaire conserve une

chance de contribuer aux futures stratégies énergétiques.

Fondamentalement, il va falloir que la recherche-développement scientifique et technique non seulement améliore les réacteurs nucléaires et le cycle du combustible actuels, mais aussi conçoive de nouveaux réacteurs et cycles originaux qui soient anti-proliférants, plus rentables, plus économiques et plus sûrs.

Sept domaines d'action. Les perspectives mondiales du nucléaire peuvent se résumer par l'action menée dans les sept domaines suivants.

Technologie. La technologie nucléaire est le résultat de cinq décennies de développement. Les commandes de centrales nucléaires ont commencé à prendre de l'importance dans les années 60 et leur exploitation commerciale a commencé à se généraliser dans les années 70. Actuellement, l'énergie nucléaire fournit dans le monde entre 6 et 7% de l'énergie primaire. La majorité des centrales en exploitation fonctionnent bien et continuent de s'améliorer.

Cependant, des problèmes ont été rencontrés dans plusieurs domaines; parfois, des centrales ont été prématurément fermées ou achevées sans avoir jamais fonctionné. Les constructions de centrales ont atteint leur apogée dans les années 70 et les raccordements au réseau dans les années 80, les niveaux actuels étant nettement inférieurs à ceux d'alors.

Les activités actuelles d'amélioration technique mises en œuvre dans l'industrie électronucléaire portent, en règle générale, sur trois types d'installations :

■ **Installations commerciales en activité.** Amélioration de la maintenance, de l'exploitation, du soutien technique, de l'approvisionnement en

combustible, et prolongement de la durée de vie.

■ Modèles évolutifs.

Améliorations à court terme de la conception et de l'exploitation consistant en des modifications peu importantes par rapport aux installations commerciales existantes.

■ Modèles novateurs.

Améliorations à long terme de la conception et de l'exploitation consistant en d'importantes modifications par rapport aux installations commerciales existantes.

Ces dernières années, de nombreuses propositions concernant de nouveaux types de réacteurs de puissance et de cycles du combustible ont surgi dans plusieurs pays. Certains de ces modèles pourraient contribuer à rajeunir l'énergie nucléaire, mais seulement s'ils sont conçus, éprouvés et testés dans des conditions qui favorisent leur réussite et leur concrétisation commerciale. Les délais de développement, dans le nucléaire, sont longs. La conception et les essais d'un nouveau modèle de réacteur nucléaire s'étalent généralement sur 15 à 20 ans, en fonction du soutien politique accordé et des ressources disponibles. Un délai bien plus long peut s'écouler avant que le candidat le plus prometteur puisse être sélectionné et testé pour devenir l'instrument d'un développement substantiel du nucléaire. Des mesures vigoureuses sont nécessaires pour maintenir et renforcer le savoir-faire nécessaire qui a été acquis.

Sûreté. Le niveau élevé de sûreté nucléaire actuel a été obtenu en apportant des améliorations constantes reposant sur l'expérience accumulée dans le monde. Des mesures de sûreté ont généralement été introduites lorsqu'elles étaient jugées "raisonnablement pratiques", comme le relève la publication de

la Collection Sécurité de l'AIEA intitulée *La sûreté des installations nucléaires*. Certains pays procèdent à une analyse formelle du rapport coût/avantage avant de décider d'améliorations. En cas d'incertitude, il est nécessaire de prendre des décisions prudentes. Vu le haut niveau actuel et futur de performance du matériel, l'accent doit être placé sur la gestion de la sûreté opérationnelle.

Il existe un vaste consensus international, y compris parmi les industriels et les organes de réglementation, concernant les objectifs de sûreté applicables aux futurs réacteurs. Comme le suggère le Groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire (INSAG), il faut, pour l'essentiel, que les futures centrales nucléaires soient dix fois plus sûres que les objectifs fixés pour les réacteurs existants (par exemple, objectifs de 10^{-5} par an pour la fréquence des dommages au cœur et de 10^{-6} par an pour les importants rejets radioactifs sur les futures centrales). Il est précisé, dans l'INSAG-12, qu'un autre objectif, pour ces futures centrales, est l'élimination pratique des séquences d'accident susceptibles d'entraîner d'importants rejets radioactifs précoces, et la prise en compte réaliste et précise, lors de la phase d'étude, des accidents graves susceptibles d'entraîner des défaillances tardives de l'enceinte de confinement de façon que leur survenue ne nécessite que des mesures de protection limitées dans l'espace et dans le temps".

Sans évolution de la technologie, ces améliorations augmenteraient le coût – tant d'investissement que d'exploitation – de l'énergie nucléaire. Le problème, s'agissant de la conception et de la démonstration des futures centrales, est alors de savoir comment porter la sûreté à des

niveaux aussi ambitieux tout en réduisant les coûts pour garantir leur compétitivité sur le marché de l'énergie.

Il ne s'agit pas là, en principe, d'une tâche impossible. La volonté d'améliorer simultanément la sûreté d'exploitation et l'efficacité économique des techniques a toujours été l'un des moteurs fondamentaux de l'ingénierie et de l'innovation.

Les modèles évolutifs s'emploient à améliorer la sûreté, ce qui nécessite, sur le plan matériel, d'utiliser des systèmes de contrôle modernes, de simplifier les systèmes de sûreté, d'utiliser des appareils perfectionnés et de prolonger les délais d'activation des systèmes de sûreté et d'intervention de l'exploitant. Sur le plan logiciel, ces solutions peuvent aider à démontrer la conformité aux exigences. En outre, l'amélioration des connaissances techniques et des codes informatiques contribue à renforcer la sûreté d'exploitation. Un autre élément est la "prise de décisions compte tenu des risques", qui vise à axer les efforts sur des questions de sûreté importantes; elle peut se traduire, dans certains cas, par un durcissement des exigences et, dans d'autres, par un assouplissement. On s'attache également à simplifier le processus d'autorisation et à accroître sa prévisibilité.

Les nouveaux modèles utilisent encore plus d'éléments visant à renforcer la sûreté inhérente. En particulier, ils s'efforcent de démontrer que des appareils perfectionnés ou nouveaux peuvent rendre caducs certains systèmes de sûreté requis sur les réacteurs actuels; soit ils ne seraient absolument pas nécessaires, soit ils ne seraient nécessaires que pour protéger l'investissement que représente la

centrale, pas pour protéger la santé et la sûreté du public. Dans ce cas, l'équipement pourrait quand même être installé; il n'aurait pas besoin, cependant, de répondre à des normes de sûreté, ce qui, actuellement, accroît considérablement son coût. Ces appareils réduiraient aussi fortement l'investissement nécessaire à la mise au point de mesures de gestion des accidents et de préparation aux situations d'urgence.

Sécurité physique. Il est indispensable d'adopter des mesures adéquates de protection et un solide cadre international pour prévenir toute détention non autorisée de matières nucléaires et d'autres matières radioactives dangereuses, ainsi que pour prévenir la destruction délibérée d'installations nucléaires ou la dispersion intentionnelle de telles matières en transit.

Gestion du combustible irradié et des déchets radioactifs. La gestion du combustible irradié et des déchets ne laisse de préoccuper le public. Dans plusieurs pays, la pénurie de lieux d'entreposage du combustible irradié pose un grave problème. Simultanément, du fait de l'absence de site d'évacuation, le combustible irradié va devoir rester entreposé plus longtemps sur le même site. L'absence de démonstration d'une installation permanente d'évacuation des déchets a multiplié les craintes et a entraîné des incertitudes quant à sa future exploitation et à la dégradation du soutien public, de la volonté politique et de la viabilité financière d'un tel projet. Des concepts originaux de cycle du combustible nucléaire reposant sur de nouvelles technologies pourraient aider à atténuer ce problème écologique en réduisant le volume et la toxicité des déchets pour améliorer la sûreté, la résistance à la prolifération et la rentabilité de l'énergie nucléaire.

Non-prolifération. La possibilité d'établissement d'un lien entre énergie nucléaire et armes nucléaires est au cœur du régime international de non-prolifération et sert de base aux garanties de l'AIEA. On sait que quinze États ont mis au point des méthodes d'enrichissement de l'uranium; tandis que son retraitement chimique n'a actuellement lieu que dans un État non doté d'armes nucléaires, la crainte persiste que les activités électronucléaires actuelles et futures n'encouragent l'acquisition d'armes nucléaires ou des technologies nécessaires à cette acquisition.

Suite aux événements survenus en Iraq et dans la République populaire démocratique de Corée, le régime international de non-prolifération a été étendu et renforcé : décision prise par les États de ne pas aider d'éventuels proliférateurs à acquérir des technologies et un savoir-faire essentiels; établissement, par les fournisseurs, d'un contrôle des matières, installations et équipements sensibles; et renforcement des garanties de l'AIEA – surtout pour ce qui est de leur aptitude à détecter toute activité non déclarée d'enrichissement ou de retraitement. Tout État qui se lancerait aujourd'hui dans un programme d'acquisition d'armes nucléaires se heurterait à des obstacles bien plus importants pour obtenir une aide internationale, risquerait bien plus d'être détecté avant de pouvoir mener à bien un tel programme, et s'exposerait davantage à des mesures concertées de contre-prolifération dans l'éventualité où un tel programme serait découvert.

Économie. La tendance mondiale à la déréglementation et au renforcement de la concurrence dans le secteur de l'électricité – parallèlement à la

faiblesse persistante du prix des combustibles fossiles et à la suroffre de capacité de base dans les pays développés – n'a pas favorisé le développement des centrales nucléaires. Bien que la plupart des centrales nucléaires existantes soient rentables, très peu de nouvelles centrales sont commandées.

L'offre, dans de nombreuses parties du monde, de gaz naturel peu onéreux et les progrès réalisés dans le domaine des turbines à gaz ainsi que l'amélioration des technologies d'extraction et de transformation du charbon ont réduit l'attrait économique que peuvent présenter de nouvelles centrales nucléaires pour des pays qui n'ont pas facilement accès au gaz naturel ou au charbon, ou qui accordent une grande importance à la sécurité.

Des études réalisées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ainsi que d'autres études réalisées aux États-Unis et à l'AIEA ont montré que compte tenu des taux élevés de rendement et des courtes périodes de remboursement fréquemment escomptées aujourd'hui, il sera difficile pour de nouvelles centrales nucléaires d'être compétitives dans des régions ayant facilement accès à du gaz ou disposant de réserves nationales de charbon. Les coûts élevés d'investissement et les délais de construction relativement longs font plus qu'annuler l'avantage économique présenté par le combustible nucléaire. Aujourd'hui, certaines centrales à gaz naturel peuvent être construites pour un coût d'investissement nettement inférieur à celui d'une centrale nucléaire équivalente et en moins d'un tiers du temps requis pour

cette dernière. À court terme, par conséquent, la capacité de l'électronucléaire ne devrait croître que dans un nombre limité de pays qui ne disposent ni de ressources énergétiques locales, ni d'infrastructures fonctionnant au gaz naturel.

Acceptation par le public et par les responsables politiques. Alors que les réacteurs de puissance nucléaires existants fonctionnent de manière fiable et sûre, des inquiétudes et des conceptions erronées se font jour lorsque la sûreté s'articule autour de systèmes complexes et des compétences du personnel d'exploitation. Malgré la mise au point de modèles évolutifs dont la sûreté a été améliorée par rapport aux centrales existantes, le soutien dont bénéficie l'énergie nucléaire s'est estompé dans de nombreux pays. Il faut s'efforcer de communiquer plus efficacement sur les progrès qui sont réalisés et pour aider le public à comprendre l'énergie nucléaire dans le contexte de la demande mondiale d'énergie, des différents systèmes énergétiques, et des cadres réglementaires et techniques dans lesquels les systèmes de production d'électricité opèrent.

UNE NÉCESSAIRE INNOVATION

À plus long terme, la situation du marché mondial de l'énergie demeure incertain. De nombreuses analyses, cependant, y compris la récente Déclaration du Conseil mondial de l'énergie, préconisent vivement de conserver comme option l'énergie nucléaire (*voir article, page 2*). La croissance continue de la population et de la demande d'énergie – surtout dans les pays en développement – ainsi que la meilleure compréhension du phénomène de changement climatique planétaire imposent de mettre en service rapidement et

de façon généralisée, dans le monde, des centrales électriques n'utilisant pas de combustibles fossiles.

À sa réunion de mars 2000, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a approuvé un Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) couvrant la période allant jusqu'en 2100. Ces scénarios prévoient, à compter de 2020, une importante demande de techniques énergétiques n'émettant pas de carbone.

Les projections concernant le développement du nucléaire sont généralement très favorables. Les scénarios prévoient certes une variation de la part du nucléaire, mais ils font constamment ressortir un vaste potentiel de croissance de celui-ci – des 350 GWe actuels à 2000-5000 GWe d'ici à 2050 et 3500-10 600 GWe d'ici à 2100 (*voir article, page 31*). Fondamentalement, la fourchette de capacités décrite dans ces scénarios pour 2050 équivaut, pour le nucléaire, à des suppléments de capacité mondiale de 50 à 150 GWe par an entre 2020 et 2050.

Compte tenu des problèmes déjà évoqués, il est difficile de prévoir, pour l'électronucléaire, une augmentation de capacité de cinq à dix fois reposant uniquement sur les techniques évolutives existantes. Des activités de recherche-développement novatrices seront nécessaires pour assurer la pleine participation de l'énergie nucléaire au futur marché mondial de l'énergie. Examinons les points suivants :

■ **Coût.** Il est nécessaire d'améliorer la compétitivité du nucléaire sur le marché déréglementé de l'énergie, en particulier dans les régions ayant facilement accès au gaz et/ou disposant de petits réseaux locaux, ainsi que pour les

applications nucléaires non électriques.

■ **Compatibilité de l'infrastructure.** La future augmentation de la demande d'électricité devrait, pour l'essentiel, se produire dans des pays peu familiers avec l'énergie nucléaire. Ces pays ne sont pas tous en mesure de développer rapidement l'infrastructure nécessaire pour exploiter des réacteurs et assurer les services inhérents aux parties initiale et terminale du cycle du combustible. De même, les critères locaux d'examen de la sûreté et d'autorisation de construction et d'exploitation devraient pouvoir être respectés à un coût raisonnable.

■ **Sûreté.** Grâce aux activités permanentes de recherche-développement, la sûreté des futurs réacteurs est en constante amélioration. L'un des objectifs est de pratiquement éliminer les séquences d'accident susceptibles d'entraîner d'importants rejets de radioactivité. Pour réduire les coûts, il faut trouver des solutions originales capables d'accroître la sûreté en simplifiant les systèmes et en utilisant mieux des appareils et équipements perfectionnés.

■ **Garanties.** L'importante augmentation, dans le monde, du nombre de centrales nucléaires et l'augmentation conséquente des quantités de plutonium présentes dans le combustible irradié sont la raison d'être des garanties de l'AIEA. Encore plus préoccupante, cependant, est la prolifération des techniques critiques d'enrichissement de l'uranium et d'extraction du plutonium.

Le coût des inspections nécessaires pour prouver avec suffisamment de certitude que les États continuent d'honorer leurs engagements en matière de non-prolifération varie largement en fonction de la technique utilisée : si la technique de référence est un

TECHNIQUES NOVATRICES LIÉES AU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

| Attribut | Procédé & système | Pays | Caractéristiques |
|--|--|-----------------------------|---|
| Composition et traitement du combustible | Pyrotraitement | Japon, Russie, États-Unis | Volume des déchets nucléaires plus faible et installation de traitement plus simple que pour le traitement humide (avantages économiques et écologiques escomptés). |
| | Combustible vibro-tassé | Russie, Suisse | Particules de combustible provenant directement d'une solution acide de retraitement (avantage économique escompté par rapport à la pulvérisation). |
| | Système DUPIC | Canada, République de Corée | Le plutonium n'est pas séparé du combustible irradié du REP (résistance à la prolifération escomptée). |
| | Thorium fuel (thorium-uranium, thorium-plutonium) | Inde, États-Unis | Le thorium est abondant. Le combustible thorium-uranium produit moins d'actinides mineurs (AM) que l'uranium-plutonium. |
| | Inert-matrix fuel | France, Japon, Suisse | Grâce à l'oxyde chimiquement stable, le combustible irradié est considéré comme forme de déchet (atténuation dans l'environnement). |
| Système séparation & transmutation (S-T) | Système mu par accélérateur | France, Japon, États-Unis | Énergie neutronique intense détruit AM, produits de fission à longue période. Cœur sous-critique renforce la sûreté. |
| | Système S-T avec réacteur à neutrons rapides (RNR) | Japon, Russie | Technologie RNR existante utilisée pour détruire AM, produits de fission à longue période. |
| Système réacteur | Réacteur à neutrons rapides au plomb (+ Bismuth) | Russie | Sûreté renforcée utilisant réfrigérant au plomb. |

réacteur à eau ordinaire, pour un réacteur de puissance en cours d'exploitation, les activités d'inspection sont environ cinq fois plus importantes; pour une centrale d'enrichissement d'uranium, elles sont dix fois plus importantes; et pour une centrale de retraitement chimique, 100 fois plus.

Il faudrait innover dans la conception des réacteurs et du cycle du combustible de façon à pouvoir à la fois développer de façon importante l'énergie nucléaire tout en minimisant l'accès aux matières qui pourraient facilement être utilisées dans des armes ou autres dispositifs explosifs nucléaires ainsi qu'aux

technologies permettant de les produire.

Disponibilité des ressources.

Les ressources traditionnelles d'uranium risquent, au bout du compte, de devenir trop onéreuses pour permettre, dans le monde, un vaste développement de l'énergie nucléaire fondé uniquement sur des réacteurs thermiques traditionnels. Il faudrait donc établir un plan approfondi pour estimer et satisfaire les futurs besoins.

Telles sont les principales raisons pour lesquelles il faut concevoir, en dehors des réacteurs évolutifs, de nouveaux types de réacteur et de cycle du combustible.

ACTIVITÉS NOVATRICES DE R&D

Modèles de réacteur novateurs.

Actuellement, 40% des centrales nucléaires en construction (23% de la capacité en construction), principalement dans des pays en développement, sont de petite taille (inférieures à 300 MWe) ou de taille moyenne (inférieures à 700 MWe). Elles intègrent les technologies de base des grandes centrales nucléaires actuelles. Les petits réacteurs évolutifs (AP-600, VVER-640, PHWR-500 et CANDU-6, par exemple) s'inspirent également de centrales existantes.

La nécessité, toutefois, d'activités novatrices de

RÉACTEURS NUCLÉAIRES DE PETITE ET MOYENNE TAILLES À L'ÉTUDE DANS LE MONDE

De petits réacteurs nucléaires sont à l'étude dans plusieurs pays. Il s'agit notamment des réacteurs suivants :

■ **Carem-25**, réacteur à eau sous pression de 25-MWe à l'étude en Argentine. Ce réacteur comprend un générateur de vapeur intégré pouvant être couplé à un système de dessalement.

■ **KLT-40**, réacteur à eau sous pression de 40-MWe à l'étude dans la Fédération de Russie. Ce réacteur est une version montée sur barge d'un petit réacteur de production d'électricité et de chaleur utilisé dans les brise-glaces dans le nord de la Sibérie.

■ **PBMR**, réacteur à haute température de 114-MWe à l'étude en Afrique du Sud. Ce réacteur modulaire à lit de boulets refroidi au gaz se caractérise par un cycle à passage unique et par des dispositifs de sûreté perfectionnés en raison de l'utilisation de particules de combustible céramique à haute capacité thermique.

■ **SMART**, réacteur à eau sous pression de 100-MWe à l'étude dans la République de Corée. Le concept de ce réacteur est pratiquement achevé et se caractérise par un générateur de vapeur intégré polyvalent pouvant notamment servir au dessalement d'eau de mer.

■ **NHR-200**, réacteur à eau sous pression de 200-MWth à l'étude en Chine. Également en Chine, la divergence initiale d'un petit réacteur à haute température de 10 MWth destiné à des applications non électriques est prévue en 2001.

■ **AHWR**, réacteur à eau lourde de 235-MWe à l'étude en Inde. Il s'agit d'un réacteur avancé à tubes verticaux qui utiliserait du combustible à base de thorium et intégrerait des systèmes de refroidissement passifs.

■ **GT-MHR**, réacteur refroidi au gaz de 285-MWe étudié conjointement par les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Japon.

recherche-développement a été reconnue par l'industrie nucléaire et par les pays qui croient dans les avantages, la viabilité et l'importance à long terme de l'énergie nucléaire. Actuellement, d'importantes activités visant à mettre au point des concepts novateurs de cycle du combustible et de réacteur nucléaire sont mises en œuvre dans plusieurs pays, dont l'Argentine, le Canada, la Chine, la France, l'Inde, l'Italie, le Japon, la République de Corée, la Russie, l'Afrique du Sud et les États-Unis (*voir tableau et encadré*).

L'attention s'est focalisée sur la mise au point de réacteurs de petite et moyenne tailles qui

présentent diverses combinaisons associant simplicité relative de conception, production de masse économique, réduction des coûts d'implantation, cœur à longue durée de vie, télé-exploitation pratiquement sans personnel, et maintenance et réapprovisionnement en combustible fossile centralisés. La Russie a démontré l'exploitation commerciale de petits réacteurs thermiques et électriques dans des régions isolées. En 1999, les États-Unis ont lancé un programme de recherche sur l'énergie nucléaire afin de mettre au point des concepts avancés de réacteur et de cycle du combustible ainsi que des améliorations scientifiques devant

permettre de surmonter les obstacles posés par le développement de l'énergie nucléaire.

Des concepts novateurs s'orientant vers des centrales plus petites à plus courts délais de construction et à plus faibles coûts d'investissement sont à l'étude dans de nombreux pays. L'intention est de produire un modèle qui sera économique, plus sûr et antiproliférant. Il ne s'agit pas seulement de concevoir une version réduite des modèles plus anciens. La construction sur site au moyen de structures et d'éléments préfabriqués, y compris de modules complets permettant une installation rapide, est l'une des caractéristiques de ces réacteurs. On espère également que ceux-ci seront plus faciles à financer et pourront être déployés même dans des régions disposant de modestes réseaux électriques.

Du point de vue de l'innovation, on peut mentionner deux modèles de réacteur avancé non refroidis à l'eau. Il s'agit de réacteurs à gaz à haute température à cycle direct et de réacteurs rapides refroidis au plomb/plomb-bismuth. Le réacteur modulaire à lit de boulets refroidi à l'hélium (PBMR) de 114-MWe sud-africain intéresse le monde entier, car il prétend présenter les caractéristiques souhaitées (y compris la compétitivité commerciale). Les Russes ont également avancé des prétentions analogues, bien qu'à une échelle plus grande, pour leur réacteur rapide refroidi au plomb.

Ces réacteurs promettent tous d'atténuer certaines des inquiétudes liées au développement du nucléaire. Il importera de sélectionner, pour les futures activités de développement et de démonstration, les meilleurs candidats.

Cycle du combustible nucléaire novateurs. Depuis le début du développement de l'énergie nucléaire dans les années 60, le système cycle fermé/surgénérateur est perçu comme étant la meilleure solution pour un développement de grande ampleur de l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, cependant, des progrès s'imposent si l'on veut résoudre divers problèmes liés à la non-prolifération, à l'atténuation de la pollution, à l'économie et au renforcement de la sûreté et de la sécurité.

Les caractéristiques attendues de cycles novateurs peuvent être définies par rapport à plusieurs objectifs :

- Compétitivité des cycles du combustible.
- Réduction des déchets radioactifs.
- Poursuite d'objectifs de non-prolifération : les matières nucléaires ne doivent pas pouvoir être facilement obtenues ou converties à des fins non pacifiques.
- Poursuite de l'amélioration de la sûreté grâce à des procédés techniques.

Bien qu'il n'existe, actuellement, aucun programme de grande ampleur consacré à la mise au point de cycles novateurs, de nombreux pays dotés de programmes électronucléaires étudient la question.

Ici encore, ces concepts de cycle du combustible promettent tous de lever au moins certaines des inquiétudes liées au développement du nucléaire. Il faudra veiller à atteindre les objectifs globaux de renouvellement de l'énergie nucléaire et, au bout du compte, se concentrer sur les cycles qui éliminent ou atténuent les préoccupations.

Les programmes novateurs actuels de R&D partagent des buts communs, mais leurs

méthodes et objectifs spécifiques diffèrent. Il en résulte notamment une grande diversité de concepts de réacteurs et de cycles du combustible. Certains programmes réexaminent d'anciens concepts que des améliorations matérielles et techniques ont aujourd'hui rendus viables. D'autres tentent d'introduire des systèmes novateurs à la place d'autres plus traditionnels afin d'obtenir d'importantes améliorations. D'autres encore ont décidé d'étudier des solutions radicalement nouvelles.

La R&D actuelle couvre pratiquement tous les principaux types de cycle du combustible et de centrale – réacteurs à eau ordinaire, réacteurs à eau lourde, réacteurs refroidis au gaz et réacteurs à métal liquide – ainsi que certains autres types. Un aperçu des activités mondiales de R&D montre que 40 à 50 concepts différents sont à l'étude. Certains en sont au stade de l'étude initiale; d'autres sont plus avancés, au stade de la conception; et quelques-uns s'approchent de la construction de prototypes ou de modèles de démonstration.

On relève aussi une grande diversité des critères dans des domaines aussi essentiels que la sûreté, la gestion des déchets, la non-prolifération, la consommation des ressources et les types d'applications énergétiques. Sur le plan économique, par exemple, tous les concepts visent à être compétitifs sur le futur marché de l'énergie, mais les avis divergent sur le fait de savoir si ces concepts devraient devenir compétitifs en tenant compte ou non de l'introduction potentielle d'une taxation du CO₂ et de l'augmentation du prix des combustibles fossiles. Compte tenu de ces incertitudes, l'énergie

nucléaire devrait aspirer à se faire valoir par elle-même.

Dans le domaine de la sûreté, certains estiment que les réacteurs à eau ordinaire actuels sont suffisamment sûrs pour être développés à grande échelle, car ils sont respectueux du voisinage (aucun rejet important de radioactivité en dehors du site même en cas d'accident grave). D'autres insistent sur le fait que le public n'acceptera un déploiement de grande ampleur du nucléaire que si l'on propose un nouveau type de réacteur sans défaillance importante au niveau du combustible, ce que revendiquent parfois les réacteurs modulaires à haute température.

Dans le domaine de la gestion des déchets, certains estiment que l'évacuation directe du combustible irradié dans le sous-sol est une solution suffisamment sûre et que pour obtenir l'acceptation du public, il suffit d'en faire la démonstration pratique. D'autres insistent sur le fait qu'il faut éliminer par combustion ou transmutation les radionucléides à longue période dangereux si l'on veut que le public soutienne un vaste déploiement du nucléaire. Les avis diffèrent pour ce qui est de savoir quels éléments dangereux il convient d'éliminer et dans quelle mesure. Une autre question à résoudre est celle de la possibilité de reprise du combustible irradié.

Dans le domaine de la non-prolifération, certains proposent de mettre au point des concepts de réacteur et de cycle du combustible "antiproliférants" (nouveaux types de combustible, nouvelles techniques de retraitement sans extraction de plutonium, nouveaux concepts de réacteurs rapides, etc.) utilisant davantage de systèmes intrinsèques empêchant tout détournement éventuel de matières nucléaires. Il n'existe cependant, parmi les chercheurs,

aucun consensus quant à la façon de mesurer le niveau de "résistance à la prolifération" et quant à la mesure dans laquelle nous devrions intensifier notre recours aux techniques.

Les spécialistes du nucléaire doivent rechercher le moyen de réduire la multiplicité des solutions et retenir celles d'entre elles qui sont le plus prometteuses.

UNE NÉCESSAIRE COOPÉRATION INTERNATIONALE

Vu le soutien limité accordé par les gouvernements à la R&D et la grande diversité des modèles conceptuels, il est impératif que les 10 à 15 prochaines années, qui seront cruciales, soient consacrées à mettre au point des réacteurs nucléaires et des cycles du combustible qui réussiront commercialement. En particulier, des objectifs trop ambitieux en matière de gestion des déchets, de sûreté ou de non-prolifération risquent d'entraîner une augmentation excessive du coût de l'énergie nucléaire, réduisant sa compétitivité.

Parallèlement aux innovations techniques, il va devenir impératif de revoir et d'adapter les mécanismes commerciaux, gouvernementaux et intergouvernementaux en fonction des progrès réalisés.

Il s'agit là, si l'on veut renouveler durablement l'énergie nucléaire, de questions importantes qu'il faudrait aborder le plus rapidement possible. L'une des façons de progresser et de parvenir à un consensus sur certaines de ces questions consiste à instaurer une collaboration internationale et une coordination mondiale des activités de R&D. Une coopération internationale entre des centres de recherche nationaux, des organisations

internationales telles que l'AIEA, l'AEN et la Commission européenne, et l'industrie nucléaire peut faciliter les progrès en centralisant les ressources aux fins de l'objectif commun. Les tâches suivantes, par exemple, pourraient être menées à bien conjointement :

- Évaluation des futurs besoins en installations et rôle de l'énergie nucléaire sur différents marchés;
- Élaboration d'un ensemble de critères souhaitables de sûreté, de sécurité, de gestion des déchets, de non-prolifération et de consommation des ressources pour les nouveaux réacteurs et cycles du combustible;

- Coopération internationale aux fins du développement des concepts les plus prometteurs.

Ces tâches sont importantes si l'on veut que les pays bénéficient durablement de la technologie nucléaire comme source d'énergie.

Activités de l'AIEA. L'AIEA met depuis longtemps en œuvre des programmes visant à aider les pays dans des domaines liés au développement de l'énergie nucléaire et au cycle du combustible. Les efforts visent maintenant à améliorer la coordination des activités et à définir des objectifs communs conformément aux intérêts des États Membres de l'Agence. Le nouveau programme et budget de l'AIEA, axé sur les résultats, pourra aider à intégrer toutes ses activités dans un programme de conception de réacteurs et de cycles du combustible novateurs permettant aux pays de mieux résoudre les problèmes de développement énergétique et électronucléaire auxquels ils sont confrontés. Ce cadre permettra d'évaluer le développement, dans le monde, de réacteurs et de cycles du combustible novateurs.

Comme le mentionne la Stratégie à moyen terme de l'Agence, l'un des principaux objectifs des activités mises en

œuvre est de soutenir et de faciliter l'échange d'informations et le développement de nouvelles applications des techniques nucléaires. Cela pourra se faire en permettant et en favorisant un examen de l'avancement des techniques liées à l'énergie nucléaire et du cycle du combustible dans les domaines suivants : petits et moyens réacteurs destinés à la production d'électricité et de chaleur, y compris le dessalement de l'eau de mer; nouvelles avancées technologiques intéressant la compétitivité, la sûreté et le rendement; amélioration de la résistance à la prolifération des réacteurs et des cycles associés; et réduction de la production de déchets radioactifs. Parmi les activités envisagées, l'Agence prévoit de mettre en rapport les États Membres qui souhaitent étudier des concepts techniques analogues. Cela aiderait grandement à regrouper, aux fins du développement de réacteurs et de cycles novateurs, les ressources et les compétences.

L'énergie nucléaire se situe aujourd'hui à un carrefour, aucun consensus n'existant quant à son futur rôle. Alors qu'elle a prouvé qu'elle pouvait aider les pays à satisfaire leurs besoins énergétiques – elle présente, dans l'optique d'un développement énergétique durable, des avantages comparatifs par rapport à d'autres modes de production d'électricité –, il lui reste à convaincre davantage le public et les responsables politiques de sa contribution potentielle. Les nouvelles initiatives et mesures intégrées mises en place pour renforcer la coopération nucléaire internationale vont permettre à l'AIEA d'agir de façon plus cohérente pour mieux servir les intérêts de ses États Membres et démontrer que l'option nucléaire est un élément vital de l'avenir énergétique de la planète. □

ÉTAT DES PROTOCOLES ADDITIONNELS

| État | Approbation Conseil de l'AIEA | Signature | Entrée en vigueur |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------|
| Allemagne ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 * | |
| Arménie | 23 sept. 1997 | 29 sept. 1997 | |
| Australie | 23 sept. 1997 | 23 sept. 1997 | 12 déc. 1997 |
| Autriche ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Azerbaïdjan | 7 juin 2000 | | |
| Belgique ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Bulgarie | 14 sept. 1998 | 24 sept. 1998 | |
| Canada | 11 juin 1998 | 24 sept. 1998 | |
| Chine | 25 nov. 1998 | 31 déc. 1998 | |
| Chypre | 25 nov. 1998 | 29 juillet 1999 | |
| Croatie | 14 sept. 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Cuba | 20 sept. 1999 | 15 oct. 1999 | |
| Danemark ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Équateur | 20 sept. 1999 | 1 oct. 1999 | |
| Espagne ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 * | |
| Estonie | 21 mars 2000 | 13 avril 2000 | |
| États-Unis | 11 juin 1998 | 12 juin 1998 | |
| Finlande ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| France ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Géorgie | 23 sept. 1997 | 29 sept. 1997 | |
| Ghana | 11 juin 1998 | 12 juin 1998 | provisoire |
| Grèce ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 * | |
| Hongrie | 25 nov. 1998 | 26 nov. 1998 | 4 avril 2000 |
| Indonésie | 20 sept. 1999 | 29 sept. 1999 | 29 sept. 1999 |
| Irlande ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Italie ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Japon | 25 nov. 1998 | 4 déc. 1998 | 16 déc. 1999 |
| Jordanie | 18 mars 1998 | 28 juillet 1998 | 28 juillet 1998 |
| Lituanie | 8 déc. 1997 | 11 mars 1998 | |
| Luxembourg ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Monaco | 25 nov. 1998 | 30 sept. 1999 | 30 sept. 1999 |
| Namibie | 21 mars 2000 | 22 mars 2000 | |
| Nigeria | 7 juin 2000 | | |
| Norvège | 24 mars 1999 | 29 sept. 1999 | 16 mai 2000 |
| Nouvelle -Zélande | 15 sept. 1998 | 24 sept. 1998 | 24 sept. 1998 |
| Ouzbékistan | 14 sept. 1998 | 22 sept. 1998 | 21 déc. 1998 |
| Pays-Bas ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 * | |
| Pérou | 10 déc. 1999 | 22 mars 2000 | |
| Philippines | 23 sept. 1997 | 30 sept. 1997 | |
| Pologne | 23 sept. 1997 | 30 sept. 1997 | 5 mai 2000 |
| Portugal ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Rép. de Corée | 24 mars 1999 | 21 juin 1999 | |
| Rép. tchèque | 20 sept. 1999 | 28 sept. 1999 | |
| Roumanie | 9 juin 1999 | 11 juin 1999 | |
| Royaume-Uni ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 | |
| Russie | 21 mars 2000 | 22 mars 2000 | |
| Saint-Siège | 14 sept. 1998 | 24 sept. 1998 | 24 sept. 1998 |
| Slovaquie | 14 sept. 1998 | 27 sept. 1999 | |
| Slovénie | 25 nov. 1998 | 26 nov. 1998 | |
| Suède ¹ | 11 juin 1998 | 22 sept. 1998 * | |
| Suisse | 7 juin 2000 | 16 juin 2000 | |
| Turquie | 7 juin 2000 | | |
| Ukraine | 7 juin 2000 | | |
| Uruguay | 23 sept. 1997 | 29 sept. 1997 | |
| Totaux | 54 | 50 | 11 |

¹ Les 15 États de l'Union européenne ont tous conclu des protocoles additionnels avec EURATOM et avec l'Agence. * Ces États ont informé l'AIEA qu'ils satisfont à leurs propres conditions internes d'entrée en vigueur. Cependant, comme stipulé dans les protocoles additionnels conclus avec les États non dotés d'armes nucléaires de l'Union européenne et d'EURATOM, "le protocole additionnel entrera en vigueur à la date à laquelle l'AIEA recevra des États et d'EURATOM notification que leurs conditions respectives d'entrée en vigueur sont réunies."

LES RÔLES DE L'AIEA SOULIGNÉS À LA SIXIÈME CONFÉRENCE D'EXAMEN DU TNP

Les Parties au Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) ont adopté, à l'issue de leur Sixième Conférence d'examen, qui s'est tenue au Siège des Nations Unies en mai 2000, un Document final. Ce document réaffirme que l'application intégrale et effective du Traité et du régime de non-prolifération, sous tous ses aspects, contribue de façon essentielle à la paix et à la sécurité mondiales. Se félicitant du consensus qui s'est dégagé autour du TNP, M. Mohamed ElBaradei, Directeur général de l'AIEA, a noté en particulier :

- la reconnaissance du fait que les garanties de l'AIEA forment un pilier fondamental du régime de non-prolifération nucléaire; et l'approbation de mesures visant à renforcer ces garanties, en particulier de mesures visant à accroître la confiance quant à l'absence de matières et d'activités nucléaires non déclarées;

- la décision prise d'adopter plusieurs mesures concrètes de désarmement nucléaire, y compris un engagement explicite pris par les États dotés d'armes nucléaires d'éliminer totalement leurs arsenaux nucléaires;

- l'engagement pris de faciliter la coopération nucléaire pacifique entre toutes les Parties au TNP et de dégager les ressources financières nécessaires au transfert de ces technologies vers les pays en développement;

- l'appel en faveur d'une adhésion de tous les États au Traité, indispensable pour atteindre les objectifs de ce dernier.

Le Dr ElBaradei a en outre noté la confiance accordée par les Parties au TNP à l'AIEA et au rôle qu'elle joue dans la mise en œuvre du Traité.

Le texte intégral du Document final, ainsi que les renvois, références et contacts pertinents, peuvent être consultés sur plusieurs pages du site Internet WorldAtom de l'AIEA consacrées au TNP à l'adresse www.iaea.org.

OUVERTURE DE LA CONFÉRENCE GÉNÉRALE DE L'AIEA LE 18 SEPTEMBRE

La session 2000 – 44^{ème} session ordinaire – de la Conférence générale de l'AIEA s'ouvrira à Vienne le 18 septembre à l'Austria Center. Sont notamment inscrits à l'ordre du jour provisoire les points suivants : programme et budget de l'Agence pour 2001; mesures de renforcement de la coopération internationale en matière de sûreté nucléaire, de sûreté radiologique et de sûreté des déchets; renforcement des activités de coopération technique de l'Agence; renforcement de l'efficacité et amélioration de l'efficacité du système des garanties et de l'application du Modèle de Protocole; mesures de lutte contre le trafic illicite de matières nucléaires et d'autres sources radioactives; application des garanties de l'AIEA au Moyen-Orient; application des résolutions du Conseil de sécurité des Nations Unies relatives à l'Iraq; et application de l'accord de garanties conclu entre l'AIEA et la République populaire démocratique de Corée.



Forum scientifique. Le thème du Forum scientifique de cette année sera : "Gestion des déchets radioactifs : convertir les options en solutions". Les séances comprendront des exposés présentés par d'éminents spécialistes, une table ronde et des discussions publiques consacrées aux différents thèmes et problèmes. Parmi les thèmes abordés figureront la gestion des déchets radioactifs dans le monde; la mise au point d'une installation nationale de stockage du combustible irradié; les aspects techniques de la gestion des déchets radioactifs; l'évacuation en toute sûreté des déchets radioactifs; le transport en toute sûreté des déchets radioactifs; et la gestion des sources de rayonnements usées scellées. Le Forum aura pour principaux objectifs de porter à l'attention des hauts responsables gouvernementaux certaines questions scientifiques et techniques importantes ayant trait à la gestion des déchets radioactifs, et de faire valoir la dimension internationale des évolutions actuelles. Comme par le passé, une couverture au jour le jour de la Conférence et du Forum sera assurée sur le site Internet WorldAtom de l'AIEA à l'adresse www.iaea.org. Les informations seront affichées sur le site dès leur mise à disposition avant et pendant la Conférence.

EN BREF...

■ **Garanties renforcées.** Cinq nouveaux États – l'Azerbaïdjan, le Nigeria, la Suisse, la Turquie et l'Ukraine – ont conclu avec l'AIEA un accord destiné à renforcer l'aptitude de l'Agence à vérifier la nature exclusivement pacifique de leurs activités nucléaires. En juin, M. Mohamed ElBaradei, Directeur général de l'AIEA, a présenté ces accords dits Protocoles additionnels au Conseil des gouverneurs de l'AIEA en vue de leur approbation (*voir état des signatures et des ratifications, page 60*).

■ **Coopération nucléaire.** Des pays africains ont récemment développé leurs activités de partenariat grâce à un accord régional de coopération dans le domaine des applications

pacifiques des sciences et techniques nucléaires. Cet accord, appelé AFRA, a été prorogé de 5 ans en avril 2000. Au mois de mai, 14 pays avaient informé l'AIEA qu'ils avaient approuvé cette prorogation.

■ **Dessalement nucléaire.** Les activités de l'AIEA visant à aider les États Membres désireux d'appliquer l'énergie nucléaire au dessalement ont été présentées par l'Agence au Forum mondial de l'eau et à la Conférence ministérielle parallèle qui se sont tenus aux Pays-Bas au début de l'année. Ont également été présentés des projets et des activités de coopération technique ayant trait à l'hydrologie isotopique. Le prochain Forum mondial de l'eau est prévu en 2003. Pour de plus

amples informations concernant cette manifestation et la participation de l'Agence à cette dernière, on pourra consulter le site Internet WorldAtom de l'AIEA à l'adresse www.iaea.org.

■ **Sources de rayonnements.** Du 23 mai au 16 juin, l'AIEA a chargé une équipe d'experts de réaliser des levés radiométriques aéroportés de certaines régions de Géorgie afin d'y détecter toute source radioactive abandonnée ou zone contaminée susceptible de nuire à la santé humaine. Cette mission – organisée à la demande du Ministère géorgien de l'environnement – a fait suite à de graves incidents liés à la découverte, ces dernières années, de près de 300 sources abandonnées dans le pays.

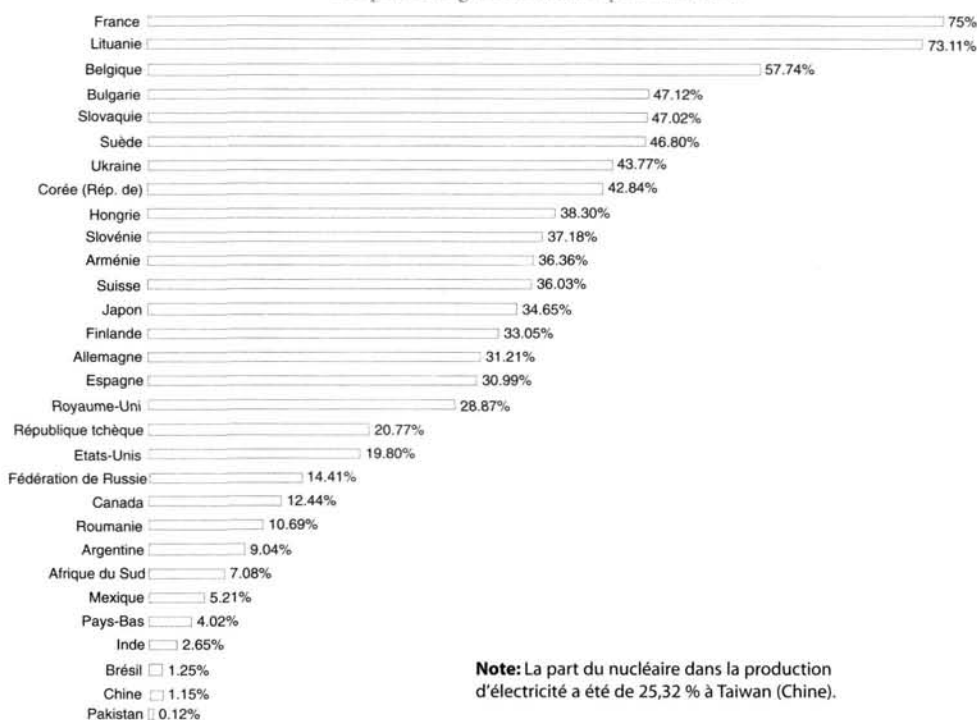
SITUATION DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE

| | EN SERVICE | | EN CONSTRUCTION | |
|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------|
| | NOMBRE DE TRANCHES | TOTAL MWE | NOMBRE DE TRANCHES | TOTAL MWE |
| AFRIQUE DU SUD | 2 | 1842 | | |
| ALLEMAGNE | 19 | 21122 | | |
| ARGENTINE | 2 | 935 | 1 | 692 |
| ARMÉNIE | 1 | 376 | | |
| BELGIQUE | 7 | 5712 | | |
| BRESIL | 1 | 626 | 1 | 1229 |
| BULGARIE | 6 | 3538 | | |
| CANADA | 14 | 9998 | | |
| CHINE | 3 | 2167 | 7 | 5420 |
| CORÉE, RÉP. DE | 16 | 12990 | 4 | 3820 |
| ESPAGNE | 9 | 7470 | | |
| ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE | 104 | 97145 | | |
| FINLANDE | 4 | 2656 | | |
| FRANCE | 59 | 63103 | | |
| HONGRIE | 4 | 1729 | | |
| INDE | 11 | 1897 | 3 | 606 |
| IRAN | | | 2 | 2111 |
| JAPON | 53 | 43691 | 4 | 4515 |
| LITUANIE | 2 | 2370 | | |
| MEXIQUE | 2 | 1360 | | |
| PAKISTAN | 1 | 125 | 1 | 300 |
| PAYS-BAS | 1 | 449 | | |
| RÉPUBLIQUE TCHÈQUE | 4 | 1648 | 2 | 1824 |
| ROUMANIE | 1 | 650 | 1 | 650 |
| ROYAUME-UNI | 35 | 12968 | | |
| RUSSIE, FÉD. DE | 29 | 19843 | 3 | 2825 |
| SLOVAQUIE | 6 | 2408 | 2 | 776 |
| SLOVÉNIE | 1 | 632 | | |
| SUÈDE | 11 | 9432 | | |
| SUISSE | 5 | 3182 | | |
| UKRAINE | 14 | 12115 | 4 | 3800 |
| TOTAL MONDIAL | 433 | 349063 | 37 | 31128 |

* Ce total inclut Taïwan (Chine), où six réacteurs totalisant 4884 MWe sont opérationnels. Deux tranches sont en construction.
Le tableau reflète la situation signalée à l'AIEA en avril 2000.

PART DU NUCLÉAIRE DANS LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Ces pourcentages sont valables pour avril 2000



Note: La part du nucléaire dans la production d'électricité a été de 25,32 % à Taïwan (Chine).

Senior Auditor, Office of Internal Audit Office of the Director General (2000/085). This P-4 post provides assurance to the Director General that a cost-effective system of internal controls and procedures is in place and functioning; independent and objective guidance, advice and appraisals to Agency managers, based on a systematic, proactive and risk-based approach, on managing resources more economically and efficiently and enhancing Agency operations; facts surrounding alleged irregularities gathered through investigation; and recommendations to strengthen the relevant internal control and monitoring systems in order to minimize the risk and prevent the recurrence of any violations and irregular activities. The post requires demonstrated experience of leading a team; excellent English oral and written communication skills, including report drafting, reviewing and revising, as well as making oral presentations, are essential; knowledge of computer systems and controls, control self assessment and risk assessment is essential; computer proficiency in standard office systems, such as Word, Excel and Access, and computer assisted audit tools is essential. Fluency in English. Knowledge of other official languages is desirable (i.e. Arabic, Chinese, French, Russian or Spanish).

Closing Date: 9 February 2001

Section Head, Dosimetry and Medical Radiation Physics Section, Division of Human Health, Department of Nuclear Sciences and Applications (2000/082). This P-5 post is responsible for the formulation, co-ordination and implementation of the Agency's activities in the field of radiation dosimetry and medical radiation physics, and for supervision and co-ordination of the Agency's Dosimetry Laboratory (Seibersdorf). In addition, the Section Head acts as IAEA secretary of the IAEA/WHO (World Health Organization) Network of Secondary Standard Dosimetry Laboratories (SSDLs) with responsibility for the preparation and revision of criteria for the establishment and operation of SSDLs. The post requires a PhD with specialization in medical radiation physics (ion chamber radiotherapy dosimetry) or radiation metrology; at least 15 years (10 years after PhD) of combined practical experience as a hospital physicist (with emphasis on radiotherapy, nuclear medicine and diagnostic X-rays) and as a metrology scientist,

substantiated by a good publication record; extensive research experience in modern dosimetry; thorough experience in the measurement and dosimetry of ionizing radiation from protection-level to processing dose levels; thorough experience with current codes of practice for the measurement of absorbed dose, recent developments in radiation dosimetry and quality assurance procedures; thorough knowledge of radiation safety measures at the hospital level, with emphasis on the protection of patients during ongoing therapeutic or diagnostic procedures; acquaintance with the work of primary standard dosimetry laboratories and familiarity with the recommendations of the International Commission of Radiation Units and Measurements and other international organizations; thorough experience in the management of scientific projects and budgeting; experience in staff supervision; ability to write scientific papers and make presentations on the subject; familiarity with the specific problems of developing countries. Fluency in written and spoken English and ability to write technical reports in English essential. Knowledge of Spanish, Russian or French desirable.

Closing Date: 9 February 2001

Regional Co-ordinator, Europe Section, Division for Europe, Latin America and West Asia Department of Technical Co-operation (2000/092). This P-5 post will manage the Europe regional nuclear safety and nuclear power projects; ensure that the programme of regional projects remain responsive to participating countries' needs in the light of rapidly changing national and technical developments in the field of nuclear safety; ensure co-operation and co-ordination of the nuclear safety and power programmes with other major donors and international organizations. The post requires an advanced university degree in nuclear engineering and sciences; at least 15 years' experience in the field of nuclear safety and power engineering and nuclear safety regulatory practices; five years' experience in a senior position in the field of international relations concerned with assistance programmes to the CEEC (Central and Eastern European Countries) and NIS (Newly Independent States) is required; extensive experience in the development, implementation and evaluation of development or technical co-operation programmes;

knowledge of national and regional issues and conditions as well as the inter-relationships between/across sectoral borders. Ability to promote participation and commitment to projects; ability to prepare reports and documents, make presentations, and to advocate donor support for approaches and activities developed by the participating States; familiarity with information technology; familiarity with/understanding of nuclear technology; and proficiency in English and another IAEA official language of the region (i.e. French, Spanish or Russian).

Closing Date: 9 February 2001

NOTE

Les avis de vacances de postes (résumés ci-dessus) sont publiés à l'intention des lecteurs souhaitant se renseigner sur le genre de postes d'administrateur à pourvoir à l'IAEA. Ils ne constituent pas des avis officiels et sont susceptibles d'être modifiés. L'IAEA envoie fréquemment aux centres et bureaux d'information de l'ONU ainsi qu'aux organes gouvernementaux et organismes de ses Etats Membres (ministère des affaires étrangères et autorité chargée de l'énergie atomique). Il est conseillé aux personnes intéressées par une éventuelle candidature de se tenir en rapport avec ces derniers. Les postes sont ouverts aux candidats, hommes ou femmes, possédant les qualifications appropriées. *De plus amples renseignements sur les possibilités d'emploi à l'IAEA peuvent être obtenus en écrivant à la Division du personnel, B.P. 100, A-1400 Vienne (Autriche).*

AVIS DE VACANCES DE POSTES SUR INTERNET

Les avis de vacances de postes d'administrateurs de l'IAEA ainsi que les formulaires de candidature sont disponibles sur Internet à l'adresse suivante:

<http://www.iaea.or.at/worldatom/jobs>
On peut également obtenir des renseignements généraux sur les conditions d'emploi à l'IAEA ainsi qu'un spécimen du formulaire de candidature. Veuillez noter que les candidatures ne peuvent être transmises par voie électronique mais doivent être adressées par écrit à la Division du personnel de l'IAEA, B.P.100, A-1400 Vienne (Autriche).



**SYSTÈME INTERNATIONAL
D'INFORMATION NUCLÉAIRE
(INIS)**

TYPE DE BASE DE DONNÉES
Bibliographique

PRODUCTEUR

Agence internationale de l'énergie
atomique en collaboration avec
103 Etats Membres de l'AIEA et
19 organismes internationaux

SERVICE COMPÉTENT

AIEA, Section INIS
B.P. 100

A-1400 Vienne (Autriche)
Téléphone: (43-1) 2600-22842
Télécopie: (43-1) 26007-29884
Mél.:

INIS.CentreServicesUnit@iaea.org
Renseignements complémentaires
sur Internet:

<http://www.iaea.org/inis/inis.htm>
Pour s'abonner à la base de données
INIS sur Internet, consulter l'adresser
suivante:

<http://www.iaea.org/inis/inisdb.htm>
Disque de démonstration disponible
gratuitement

**PLUS DE 2 MILLIONS
D'ENREGISTREMENTS
CONSULTABLES EN LIGNE
(DEPUIS 1970)**

DOMAINE

Informations venant du monde entier
sur les utilisations pacifiques de la
science et de la technologie
nucléaires ainsi que sur les incidences
économiques et environnementales
d'autres sources d'énergie.

SUJETS TRAITÉS

Les principaux sujets traités sont les
réacteurs nucléaires, la sûreté des
réacteurs, la fusion nucléaire,
l'application des rayonnements ou
des isotopes en médecine, en
agriculture, dans l'industrie et dans la
lutte contre les ravageurs ainsi que
des domaines connexes tels que la
chimie nucléaire, la physique
nucléaire et la science des matériaux.
L'accent est mis en particulier sur les
effets environnementaux,
économiques et sanitaires de
l'énergie nucléaire ainsi que sur les
incidences économiques et
environnementales des sources
d'énergie non nucléaires et sur les
aspects juridiques et sociaux de
l'énergie nucléaire.



**SYSTÈME DE DOCUMENTATION
SUR LES RÉACTEURS DE
PUISSANCE
(PRIS)**

DESCRIPTION

Répertoire technique

PRODUCTEUR

Agence internationale
de l'énergie atomique
en collaboration avec
29 de ses Etats membres

SERVICE COMPÉTENT

AIEA, Section du génie nucléaire
B.P. 100, A-1400 Vienne (Autriche)
Téléphone +43-1-2600
Télex 1-12645

Téléfax +43-1-26007

Courrier électronique:

r.spiegelberg-planer@iaea.org
Renseignements

complémentaires sur Internet:
<http://www.iaea.org/programms/a2/>

DOMAINE

Information mondiale sur
les réacteurs de puissance
en exploitation, en construction,
en projet ou mis à l'arrêt
et données d'expérience sur
l'exploitation des centrales
nucléaires dans les Etats
Membres de l'AIEA

SUJETS TRAITÉS

Etat du réacteur, désignation,
emplacement, type,
constructeur, fournisseur des
turbo-alternateurs,
propriétaire et exploitant de la
centrale, puissance thermique,
puissance électrique brute et
nette, date de mise en chantier,
date de la première criticité, date
de la première synchronisation
avec le réseau, exploitation
industrielle, date de la mise à
l'arrêt, caractéristiques
du coeur du réacteur
et renseignements sur les
systèmes de la centrale; énergie
produite, arrêts prévus et
imprévus, facteur de
disponibilité et d'indisponibilité,
facteur d'exploitation
et facteur de charge.



**SYSTÈME DE DOCUMENTATION
SUR LES CONSTANTES NUCLÉAIRES
(NDIS)**

DESCRIPTION

Données numériques
et bibliographiques

PRODUCTEUR

Agence internationale de l'énergie
atomique en collaboration avec le
Nuclear Data Centre du Laboratoire
national de Brookhaven (Etats-Unis),
la Banque de constantes nucléaires
de l'Agence pour l'énergie nucléaire
de l'Organisation de coopération et
de développement économiques, à
Paris, et un réseau de plus de 20
autres centres de constantes
nucléaires dans le monde

SERVICE COMPÉTENT

AIEA, Section des constantes
nucléaires B.P. 100, A-1400 Vienne
(Autriche)

Téléphone +43-1-2600
Télex 1-12645

Téléfax +43-1-26007

Courrier électronique:

o.schwerer@iaea.org

Renseignements complémentaires
sur Internet:
<http://www.nds.iaea.org/>

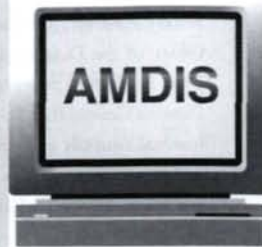
DOMAINE

Fichier de constantes de physique
nucléaire numériques décrivant
l'interaction des rayonnements avec
la matière, et renseignements
bibliographiques connexes.

SUJETS TRAITÉS

Constantes évaluées de
réactions neutroniques en ENDF;
constantes expérimentales de
réactions nucléaires en EXFOR, pour
les réactions produites par
les neutrons, les particules
chargées, ou les photons; périodes
nucléaires et constantes de
désintégration radioactive dans
les systèmes NUDAT et ENSDF;
renseignements bibliographiques
connexes tirés des bases de données
de l'AIEA, CINDA et NSR;
divers autres types de données.

*Note: L'information NDIS recherchée
en mode non connecté peut aussi être
obtenue du producteur sur disquette,
cédérom et cartouche DAT 4mm.*



**SYSTÈME DE DOCUMENTATION
SUR LES CONSTANTES
ATOMIQUES ET MOLÉCULAIRES
(AMDIS)**

DESCRIPTION

Données numériques et
bibliographiques

PRODUCTEUR

Agence internationale de l'énergie
atomique en collaboration avec
le réseau international des centres
de constantes atomiques et
moléculaires, qui regroupe 16
centres de constantes nationales

SERVICE COMPÉTENT

Unité de constantes atomiques
et moléculaires, Section des
constantes nucléaires de l'AIEA
Courrier électronique:
j.a.stephen@iaea.org

Renseignements complémentaires
sur Internet:
<http://www.iaea.org/programs/ri/nds/amdisintro.htm>

DOMAINE

Données atomiques et moléculaires
et données sur l'interaction plasma-
surface, ainsi que sur les propriétés
des matériaux intéressants du point
de vue de la recherche et de la
technologie relatives à la fusion.

SUJETS TRAITÉS

Données au format ALADDIN
relatives à la structure atomique et
aux spectres (niveaux d'énergie,
longueurs d'onde et probabilités de
transition); collisions d'électrons et
de particules lourdes avec des
atomes, des ions et des molécules
(sections efficaces et/ou coefficients
de vitesse, y compris, dans la plupart
des cas, ajustement analytique avec
les données); érosion superficielle
par impact des principaux
composants du plasma et
auto-érosion; réflexion de
particules sur les surfaces;
propriétés thermophysiques et
thermomécaniques du béryllium
et des graphites pyrolytiques.

*Note: Le résultat des recherches
effectuées en mode déconnecté peut
être obtenu du producteur sur
disquette, sur bande magnétique ou
sous forme imprimée.*

*Le logiciel ALADDIN et son manuel
d'utilisation sont également
disponibles
auprès du producteur.*

Pour accéder à ces bases de données, s'adresser aux producteurs. L'information peut aussi être fournie par le producteur sous forme imprimée, à titre onéreux. INIS et AGRIS sont également disponibles sur CD-ROM. Des renseignements sur l'ensemble des bases de données de l'AIEA peuvent être obtenus par le biais des services Internet de l'Agence sous WorldAtom à l'adresse suivante: <http://www.iaea.org>.

Canberra Safeguards Systems...



A World of Support

Safeguards requires experience, reliability, reproducibility, worldwide support and, above all, an understanding of the requirements of the various international and domestic agencies that share a common mission to control the spread of nuclear weapons. Safeguards is an application that requires a company like Canberra – a company that offers, not only the technical expertise, but also the experience and resources necessary to meet our customers' need for integrated and remote safeguards solutions.

The recent addition of the Aquila safeguards product lines of asset tracking devices, seals, and surveillance systems has increased our ability to meet the total needs of our safeguards customers.

Our commitment to nuclear safeguards is total – from portable instruments used to conduct independent verification measurements, to complex unattended safeguards measurement systems used to monitor nuclear material in the world's largest reprocessing plants – from surveillance cameras used to continuously record activities in safeguarded facilities to electronic tags and seals used to prevent undetected tampering of equipment or containers.

For the total solution to your safeguards requirements, contact Canberra to see how...

Real People tackle Real Challenges and offer Real Solutions.



Canberra Industries
800 Research Parkway, Meriden, CT 06450 U.S.A.
Tel: (203) 238-2351 Toll Free 1-800-243-4422
FAX: (203) 235-1347 <http://www.canberra.com>

With Offices In: Australia, Austria, Belgium, Canada,
Central Europe, Denmark, France, Germany, Italy,
Netherlands, Russia, United Kingdom.

LIEUX DE VENTE DES PUBLICATIONS DE L'AIEA

Dans les pays ci-après, les publications de l'AIEA sont en vente aux adresses indiquées ci-après ou par l'intermédiaire des principales librairies locales.

Le paiement peut être effectué en monnaie locale ou en coupons de l'UNESCO.

ALLEMAGNE

UNO-Verlag, Vertriebs- und Verlags GmbH
Poppelsdorfer Allee 55, D-53115 Bonn
Téléphone: +49 228 94 90 20
Facsimilé: +49 228 21 74 92
Web site: <http://www.uno-verlag.de>
Courriel électronique: unoverlag@aol.com

AUSTRALIE

Hunter Publications
58A Gipps Street, Collingwood, Victoria 3066
Téléphone: +61 3 9417 5361
Facsimilé: +61 3 9419 7154
Courriel électronique: jpdavies@ozemail.com.au

BELGIQUE

Jean de Lannoy
avenue du Roi 202, B-1190 Bruxelles
Téléphone: +32 2 538 43 08
Facsimilé: +32 2 538 08 41
Courriel électronique: jean.de.lannoy@infoboard.be
Web site: <http://www.jean-de-lannoy.be>

BRUNEI

voir Malaisie

CHINE

Publications de l'AIEA en chinois:
Nuclear Information Center, Translation Service
P.O. Box 2103, Beijing 100037

DANEMARK

Munksgaard Subscription Service,
Nørre Søgade 35, P.O. Box 2148
DK-1016 Copenhagen K
Téléphone: +45 33 12 85 70
Facsimilé: +45 33 12 93 87
Courriel électronique:
subscription.service@mail.munksgaard.dk
Web site: <http://www.munksgaard.dk>

ESPAGNE

Díaz de Santos, Lagasca 95,
E-28006 Madrid
Téléphone: +34 1 431 24 82
Facsimilé: +34 1 575 55 63
Courriel électronique: madrid@diazdesantos.es
Díaz de Santos, Balmes 417-419
E-08022 Barcelona
Téléphone: +34 3 212 86 47
Facsimilé: +34 3 211 49 91
Courriel électronique: balmes@diazsantos.com
Courriel électronique: librerias@diazdesantos.es
Web site: <http://www.diazdesantos.es>

ETATS-UNIS D'AMÉRIQUE

Bernan Associates
4611-F Assembly Drive, Lanham MD 20706-4391, EE UU
Téléphone: 1-800-274-4447 (sans taxe)
Facsimilé: (301) 459-0056/
1-800-865-3450 (sans taxe)
Courriel électronique: query@bernand.com
Web site: <http://www.bernand.com>

FRANCE

Nucléon, Immeuble Platon, Parc les Algorithmes
F-91194 Gif-sur-Yvette, Cedex
Téléphone: +33 1 69 353636
Facsimilé: +33 1 69 350099
Courriel électronique: nucleon@wanadoo.fr

HONGRIE

Librotrade Ltd., Book Import
P.O. Box 126, H-1656 Budapest
Téléphone: +36 1 257 7777
Facsimilé: +36 1 257 7472
Courriel électronique: books@librotrade.hu

ISRAËL

YOZMOT Ltd.
3 Yohanan Hasandlar St.

P.O. Box 56055, IL-61560 Tel Aviv
Téléphone: +972 3 5284851
Facsimilé: +972 3 5285397

ITALIE

Libreria Scientifica Dott. Lucio di Biasio "AEIOU",
Via Coronelli 6, I-20146 Milan
Téléphone: +39 2 48 95 45 52 or 48 95 45 62
Facsimilé: +39 2 48 95 45 48

JAPON

Maruzen Company, Ltd.
P.O. Box 5050, 100-31 Tokyo International
Téléphone: +81 3 3272 7211
Facsimilé: +81 3 3278 1937
Courriel électronique: yabe@maruzen.co.jp
Web site: <http://www.maruzen.co.jp>

MALAISIE

Parry's Book Center Sdn. Bhd.
60 Jalan Negara, Taman Melawati, 53100 Kuala Lumpur
Téléphone: +60 3 4079176, 4079179, 4087235, 4087528
Facsimilé: +60 3 407 9180
Courriel électronique: haja@pop3.jaring.my
Web site: <http://www.mol.net.my/~parrybook/parrys.htm>

PAYS-BAS

Martinus Nijhoff International
P.O. Box 269, NL-2501 AX The Hague
Téléphone: +31 793 684 400;
Facsimilé: +31 793 615 698
Courriel électronique: info@nijhoff.nl
Web site: <http://www.nijhoff.nl>
Swets and Zeitlinger b.v.,
P.O. Box 830, NL-2160 SZ Lisse
Téléphone: +31 252 435 111;
Facsimilé: +31 252 415 888
Courriel électronique: infoho@swets.nl
Web site: <http://www.swets.nl>

POLOGNE

Foreign Trade Enterprise, Ars Polona, Book Import Dept.
7, Krakowskie Przedmieście Street
PL-00-950 Warsaw
Téléphone: +48 22 826 1201 ext. 147, 151, 159
Facsimilé: +48 22 826 6240
Courriel électronique: ars_pol@bevy.hsn.com.pl
Web site: <http://www.arspolona.com.pl>

ROYAUME-UNI

The Stationary Office Ltd, International Sales Agency
51 Nine Elms Lane, London SW8 5DR
Téléphone: +44 171 873 9090;
Facsimilé: +44 171 873 8463
Courriel électronique: book.orders@theso.co.uk
Renseignements: ipa.enquiries@theso.co.uk
Web site: <http://www.the-stationery-office.co.uk>

SINGAPOUR

Parry's Book Center Pte. Ltd.,
528 A MacPHERSON Road, Singapore 1336
Téléphone: +65 744 8673;
Facsimilé: +65 744 8676
Courriel électronique: haja@pop3.jaring.my
Web site: <http://www.mol.net.my/~parrybook/parrys.htm>

SLOVAQUIE

Alfa Press, s.r.o, Krizkova 9, SK-811 04 Bratislava
Téléphone/Facsimilé: +421 7 566 0489

Les commandes et les demandes de renseignements
peuvent aussi être envoyées directement à l'adresse
suivante:

Unité de la promotion et de la vente des publications
Agence internationale de l'énergie atomique
Wagramerstrasse 5, P.O. Box 100
A-1400 Vienne, Autriche
Téléphone: +43 1 2060 22529 (or 22530)
Facsimilé: +43 1 2060 29302
Courriel électronique: sales.publications@iaea.org
Web site: <http://www.iaea.org/worldatom/publications>

SAFETY REPORTS SERIES

IMPLEMENTATION AND REVIEW OF A
NUCLEAR POWER PLANT AGEING
MANAGEMENT PROGRAMME
Safety Report Series No. 15
ISBN 92-0-100999-2 Price: ATS200/€14.53

RADIATION PROTECTION AND SAFETY IN
INDUSTRIAL RADIOGRAPHY
Safety Report Series No. 13
ISBN 92-0-100199-1 Price: ATS1440

HEALTH SURVEILLANCE OF PERSONS
OCCUPATIONALLY EXPOSED TO IONIZING
RADIATION: GUIDANCE FOR OCCUPATIONAL
PHYSICIANS, Safety Reports Series No. 5
ISBN 92-0-103898-4 Price: ATS 200

DEVELOPING SAFETY CULTURE IN NUCLEAR
ACTIVITIES — Practical Suggestions to Assist
Progress, Safety Reports Series No. 11
ISBN 92-0-104398-8 Price: ATS 280

TECHNICAL REPORTS SERIES

VERIFICATION AND VALIDATION OF
SOFTWARE RELATED TO NUCLEAR POWER
PLANT INSTRUMENTATION AND CONTROL
Technical Report Series No. 384
ISBN 92-0-100799-X Price: ATS480/€34.88

NUCLEAR MEASUREMENTS, TECHNIQUES
AND INSTRUMENTATION
Technical Report Series No. 393
ISBN 92-0-100699-3 Price: ATS680

**RADIOLOGICAL ASSESSMENT
REPORTS SERIES**

RADIOLOGICAL CONDITIONS OF THE
WESTERN KARA SEA
ISBN 92-0-104298-1, Price: ATS 440

RADIOLOGICAL CONDITIONS THE
SEMIPALATINSK TEST SITE, KAZAKHSTAN:
PRELIMINARY ASSESSMENT AND
RECOMMENDATIONS FOR FURTHER STUDY
ISBN 92-0-104098-9, Price: ATS 200

THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN TAMMIKU
ISBN 92-0-100698-5 Price: ATS 280

MISCELLANEOUS

OPERATING EXPERIENCE WITH NUCLEAR
POWER STATIONS IN MEMBER STATES IN
1997
ISBN 92-0-104898-X, Price: ATS 2440

DIRECTORY OF NUCLEAR RESEARCH
REACTORS 1998
ISBN 92-0-104998-6, Price: ATS 2520

Tous les prix sont indiqués en ATS
(Schillings autrichiens). Pour tout
renseignement complémentaire
concernant les publications de l'AIEA
proposées à la vente, s'adresser à la
Division des publications de l'Agence
(mél.: sales.publications@iaea.org).
Une liste complète des publications de
l'Agence est disponible sur le site
Internet WorldAtom à l'adresse:
<http://www.iaea.org>

AMSR 150 . . .

the Future of Neutron Coincidence Counting — **HERE and NOW**



**Authorised
For Routine
Safeguards
Inspection**

Latest Generation of Los Alamos Advanced Multiplicity Shift Register for Advanced Neutron Measurements and Remote Monitoring Applications

- The only multiplicity shift register guaranteed to be fully compatible with the IAEA Neutron Coincidence Counting (INCC) software and with Multi-Instrument Collect
- Emulates and is backward compatible with JSR-11 and JSR-12 shift registers
- Local and remote operating modes
- "Smart" network connectivity (automated setup and operation by computer)
- Local data storage provides buffer against network failure
- Built-in processor for authentication, encryption, local real-time analysis, and event triggering
- Full multiplicity electronics provides neutron totals, doubles, and triples distributions
- Provides all necessary voltages for neutron coincidence/multiplicity counters
- Extensive connectivity:
 - Serial-port interface
 - Ethernet (network interface cards)
 - PCMCIA interface
 - Two auxiliary scalars
 - Flash memory storage cards
 - External trigger signals for other sensors such as cameras

The AMSR 150 is available NOW from both ANTECH and ORTEC.

ANTECH


PerkinElmer[™]
instruments.

ORTEC[®] **HOTLINE 800-251-9750**

USA

(303) 430-8184

UK

(01491) 824444

USA

(423) 482-4411

CANADA

(800) 268-2735

AUSTRIA

(01) 91422510

FRANCE

04.76.90.70.45

UK

(0118) 9773003

ITALY

(02) 2383210

JAPAN

(047) 3927888

GERMANY

(07081) 1770

RUSSIA

(02) 9374594

PRC

(010) 6566 8166

LES PROJETS DE RECHERCHE COORDONNÉS DE L'AIEA

MISE AU POINT DE TROUSSES DE RADIOPHARMACEUTIQUES MARQUÉS AU TECHNÉTIUM 99M DESTINÉES À L'IMAGERIE DIAGNOSTIQUE D'INFECTIONS

Les maladies infectieuses restent une cause majeure de morbidité et de mortalité dans le monde. Or, l'imagerie scintigraphique peut être utile pour le diagnostic d'un certain nombre d'états pathologiques difficiles à diagnostiquer autrement. Il importe pour cela de disposer de radiopharmaceutiques ayant la propriété de se concentrer sélectivement sur les sites d'infection. Les radiopharmaceutiques disponibles pour l'imagerie diagnostique d'infections sont peu nombreux et présentent des inconvénients liés à leur coût, leur disponibilité ou leur efficacité. La mise au point de substances nouvelles ou améliorées, marquées au Tc99m, qui est l'isotope le plus couramment employé en imagerie, reste donc un objectif important pour la recherche-développement scientifique. Ce PRC a pour but de mettre au point, pour l'imagerie diagnostique d'infections, des agents spécifiques reposant sur un anticorps monoclonal ou ses fragments et sur des peptides.

TECHNOLOGIES DE TRAITEMENT DES DONNÉES ET DE DIAGNOSTIC POUR LE CONTRÔLE DE LA CHIMIE DE L'EAU ET DE LA CORROSION (DAWAG)

La corrosion des matériaux entrant dans la composition des gaines du combustible et d'éléments du circuit primaire constitue depuis de nombreuses années un problème préoccupant dans les réacteurs nucléaires refroidis par eau, notamment ceux qui fonctionnent à des taux de combustion et de rendement thermique élevés. Pour y répondre, l'Agence mène sans interruption depuis 1981 une série de projets de recherche coordonnée (PRC) visant à mieux comprendre les processus de corrosion des gaines (CCI, 1981-86), à améliorer la technologie des réfrigérants (WACOLIN, 1987-91) et à mettre au point et appliquer des techniques/capteurs avancés de surveillance en ligne de la chimie de l'eau et de la corrosion dans les centrales nucléaires (WACOL, 1995-2000). Le PRC WACOL a montré que, pour tirer pleinement profit de l'utilisation en temps réel de capteurs en ligne, il est nécessaire de recueillir et d'analyser en continu les signaux provenant des capteurs et d'autres données chimiques et opérationnelles à l'aide de logiciels d'acquisition et d'évaluation de données. Des systèmes d'acquisition de données ainsi que des systèmes intelligents de diagnostic de la chimie de l'eau sont déjà en place dans certaines installations industrielles.

CONSERVATION ET APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DES RHTRG

Ce projet a pour objet de recenser les besoins en matière de recherche et d'échanger des informations sur les progrès technologiques accomplis dans un nombre limité de domaines techniques présentant un grand intérêt pour la conception de réacteurs à haute température (RHT) et d'établir, dans le cadre de ces domaines techniques, une fonction de coordination centralisée pour la conservation du savoir-faire lié aux réacteurs à haute température refroidis par gaz (RHTRG) et pour la collaboration internationale, utilisant des méthodes électroniques d'échange d'informations, d'acquisition de données et d'archivage.

La liste ci-dessus est sélective et provisoire. Pour des renseignements complémentaires concernant les réunions, s'adresser à l'AIEA, Section des services de séances, ou se reporter à la publication trimestrielle de l'AIEA intitulée *Meetings on Atomic Energy*, et consulter les services WorldAtom de l'AIEA sur Internet à l'adresse suivante: <http://www.iaea.org>. Des précisions sur les programmes de recherche coordonnée (PRC) peuvent être obtenues à l'AIEA, auprès de la Section d'administration des contrats de recherche. Les PRC visent à faciliter la coopération mondiale dans divers domaines scientifiques et techniques, concernant aussi bien les applications médicales, agronomiques et industrielles des rayonnements que la technologie et la sûreté du secteur électronucléaire.



COLLOQUES ET SEMINAIRES ORGANISÉS PAR L'AIEA 2001

MARS

Conférence internationale sur la radioprotection des patients en radiologie diagnostique et opératoire, en médecine nucléaire et en radiothérapie

26-30 mars, Torremolinos [Málaga] (Espagne)

AVRIL

Conférence internationale sur l'étude des changements écologiques à l'aide des techniques isotopiques

23 - 27 avril, Vienne (Autriche)

MAI

Conférence internationale sur la sécurité des matières – Prévention, interception et répression des utilisations illicites des matières nucléaires et des sources radioactives

7-11 mai, Stockholm (Suède)

Séminaire international sur la situation actuelle et l'avenir des réacteurs de faible ou de moyenne puissance

27-31 mai, Le Caire (Égypte)

AOÛT

Colloque international sur les moyens isotopiques de surveillance de la situation nutritionnelle dans les programmes de nutrition et de développement (partie intégrante de la 17ème Conférence internationale de l'Union internationale des sciences de la nutrition)

27 - 31 août, Vienne (Autriche)

SEPTEMBRE

45ème Conférence générale de l'AIEA

17-21 septembre, Vienne (Autriche)

OCTOBRE

Colloque international sur les garanties internationales

29 octobre - 2 novembre, Vienne (Autriche)

NOVEMBRE

Colloque international sur l'utilisation des accélérateurs à faible énergie

Dates à déterminer, Sao Paulo (Brésil)

Informations sujettes à modifications. Voir encadré ci-contre.

AIEA BULLETIN

PUBLICATION TRIMESTRIELLE DE
L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE
Publication de la Division de l'information
Agence internationale de l'énergie atomique
B.P. 100, A-1400 Vienne (Autriche)
Tél: (43-1) 2600-21270 Télécopie: (43-1) 26007
Courrier électronique: official.mail@iaea.org
Internet: www.iaea.org

DIRECTEUR GENERAL: M. Mohamed ElBaradei
DIRECTEURS GÉNÉRAUX ADJOINTS:
M. David Waller, M. Pierre Goldschmidt,
M. Victor Mourovov, M. Werner Burkart,
M. Jihui Qian, M. Zygmund Domaratzki
**DIRECTEUR, DIVISION
DE L'INFORMATION:** M. David Kyd

REDACTEUR EN CHEF:
M. Lothar H. Wedekind
SECRÉTAIRES DE RÉDACTION:
Mlle. Ritu Kenn
MISE EN PAGE/CONCEPTION:
Mlle. Ritu Kenn; M. S. Brodek

RUBRIQUE ACTUALITES:
Mme A. Schifmann, Mme R. Spiegelberg
PRODUCTION: M. P. Witzig, M. R. Kelleher,
M. D. Schroder, M. R. Breitenecker,
M. H. Baumgartner, Mme P. Murray, M. A. Adler,
M. R. Luttenfeldner, M. L. Nimetzki

SERVICES LINGUISTIQUES:
Division des Langues
ÉDITION FRANÇAISE: M. Yvon Prigent
traduction, contrôle rédactionnel

ÉDITION ESPAGNOLE: Equipo de Servicios de
Traductores e Intérpretes (ESTI), La Havane
(Cuba), traduction;
M. L. Herrero, contrôle rédactionnel

ÉDITION CHINOISE:
Service de traduction de la Société industrielle
de l'énergie nucléaire de Chine, Beijing,
traduction, impression, distribution
ÉDITION RUSSE: JSC Interdiakt+, Moscou;
traduction, impression, distribution

PUBLICITÉ
Les annonceurs sont priés d'adresser leur
correspondance à la Division des publications
de l'AIEA, Unité de vente des publications
et de la publicité, B.P. 100, A-1400 Vienne
(Autriche). Les numéros de téléphone et
de télécopie ainsi que l'adresse de courrier
électronique sont marqués ci-dessus.

Le *Bulletin de l'AIEA* est distribué gratuitement à
un nombre restreint de lecteurs
qui s'intéressent aux activités de l'AIEA et aux
utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire.
Pour bénéficier de ce service, écrire à la
rédaction du *Bulletin*. Des extraits des textes
contenus dans le *Bulletin* peuvent être utilisés
librement sous réserve d'en mentionner
la source. Toutefois, un article dont l'auteur n'est
pas membre du personnel de l'AIEA ne peut
être reproduit qu'avec la permission de l'auteur
ou de l'organisme dont il émane, sauf s'il est
destiné à servir de document de travail. Les
opinions exprimées par les auteurs des articles
ou dans les publicités publiées dans le *Bulletin
de l'AIEA* ne correspondent pas forcément à
celles de l'Agence internationale de l'énergie
atomique et n'engagent donc que les
signataires ou les annonceurs.

AIEA ÉTATS MEMBRES

| | | | |
|--|---|--|---|
| 1957 Afghanistan Afrique du Sud Albanie Allemagne Argentine Australie Autriche Bélarus Brésil Bulgarie Canada Corée, République de Cuba Danemark Egypte El Salvador Espagne Etats-Unis d'Amérique Ethiopie Fédération de Russie France Grèce Guatemala Haïti Hongrie Inde Indonésie Islande Israël Italie Japon Maroc Monaco Myanmar Norvège Nouvelle-Zélande Pakistan Paraguay Pays-Bas Pérou Pologne Portugal République Dominicaine Roumanie Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord | Saint-Siège Sri Lanka Suède Suisse Thaïlande Tunisie Turquie Ukraine Venezuela Viet Nam Yougoslavie 1958 Belgique Cambodge Equateur Finlande Iran, Rép. islamique d' Luxembourg Mexique Philippines Soudan 1959 Iraq 1960 Chili Colombie Ghana Sénégal 1961 Liban Mali Zaïre 1962 Arabie Saoudite Libéria 1963 Algérie Bolivie Côte d'Ivoire Jamahiriya Arabe Libyenne | République Arabe Syrienne Uruguay 1964 Cameroun Gabon Koweït Nigeria 1965 Chypre Costa Rica Jamaïque Kenya Madagascar 1966 Jordanie Panama 1967 Ouganda Sierra Leone Singapour 1968 Lichtenstein 1969 Malaisie Niger Zambie 1970 Irlande 1972 Bangladesh 1973 Mongolie 1974 Maurice 1976 Emirats Arabes Unis Qatar | République-Unie de Tanzanie 1977 Nicaragua 1984 Chine 1986 Zimbabwe 1992 Croatie Estonie Slovénie 1993 Arménie Lituanie République tchèque Slovaquie 1994 Iles Marshall Kazakhstan L'ex-République yougoslave de Macédoine Ouzbékistan Yémen 1995 Bosnie-Herzégovine 1996 Géorgie 1997 Lettonie Malte République de Moldova 1998 Benin Burkina Faso 1999 Angola Honduras |
|--|---|--|---|

Dix-huit ratifications étaient nécessaires pour l'entrée en vigueur du Statut de l'AIEA. Au 29 juillet 1957, les Etats figurant en caractères gras avaient ratifié le Statut.
L'année représente l'année de l'admission de l'Etat comme membre de l'AIEA. Les Etats ne figurent pas nécessairement sous le nom qu'ils avaient à l'époque.
L'admission des Etats dont le nom apparaît en italique a été approuvée par la Conférence générale mais ne prendra effet que lorsque les instruments juridiques nécessaires auront été déposés.



L'Agence internationale de l'énergie atomique, qui est née le 29 juillet 1957, est une organisation inter-gouvernementale indépendante faisant partie du système des Nations Unies. Elle a son siège à Vienne (Autriche) et compte 130 Etats Membres qui coopèrent pour atteindre les principaux objectifs du Statut de l'AIEA: hâter et accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier et s'assurer, dans la mesure de ses moyens, que l'aide fournie par elle-même ou à sa demande ou sous sa direction ou sous son contrôle n'est pas utilisée de manière à servir à des fins militaires.

Siège de l'AIEA, au Centre international de Vienne.

Until now, one of the biggest problems with reading personal exposure doses has been the size of the monitoring equipment. Which is precisely why we're introducing the Electronic Pocket Dosimeter (EPD) "MY DOSE mini™" PDM-Series.

These high-performance

dosimeters combine an easy-to-read digital display with a wide measuring range suiting a wide range of needs.

But the big news is how very small and lightweight they've become. Able to fit into any pocket and weighing just 50~90 grams,

the Aloka EPDs can go anywhere you go. Which may prove to be quite a sizable improvement, indeed.

SCIENCE AND HUMANITY

ALOKA

ALOKA CO., LTD.

6-22-1 Mure, Mitaka-shi, Tokyo 181, Japan

Telephone: (0422) 45-5111

Facsimile: (0422) 45-4058

Telex: 02822-344

To: 3rd Export Section
Overseas Marketing Dept.
Attn: N. Odaka

| Model | Energy | Range | Application |
|---------|----------------|-----------------------|--------------------------------------|
| PDM-101 | 60 keV ~ | 0.01 ~ 99.99 μ Sv | High sensitivity, photon |
| PDM-102 | 40 keV ~ | 1 ~ 9,999 μ Sv | General use, photon |
| PDM-173 | 40 keV ~ | 0.01 ~ 99.99 mSv | General use, photon |
| PDM-107 | 20 keV ~ | 1 ~ 9,999 μ Sv | Low energy, photon |
| PDM-303 | thermal ~ fast | 0.01 ~ 99.99 mSv | Neutron |
| ADM-102 | 40 keV ~ | 0.001 ~ 99.99 mSv | With vibration & sound alarm, photon |



Safety, convenience and a variety of styles to choose from.



PDM-107



PDM-102



PDM-173



PDM-101



PDM-303



ADM-102