

# Le nucléaire après Tchernobyl: nouvelles perspectives internationales

*L'expansion du nucléaire faiblit depuis dix ans mais on prévoit une croissance régulière pour le siècle prochain*

par  
Poong Eil Juhn  
et Jürgen Kupitz

Les statistiques prouvent que le nucléaire est devenu une importante source d'énergie dans bon nombre de pays depuis son avènement il y a une quarantaine d'années. Dans les années 60, l'industrie était convaincue que c'était une option énergétique fiable et rentable; les programmes allaient bon train dans le monde entier, de sorte que les centrales nucléaires ont proliféré dans les années 70. Selon le Système de documentation de l'AIEA sur les réacteurs de puissance (PRIS), la production nucléo-électrique atteignait 692,1 térawattheures (TWh) en 1980, soit 8,4 % de la production totale d'électricité (voir les graphiques), autrement dit près de neuf fois plus qu'en 1970, avec une croissance annuelle moyenne de 24 % pendant cette décennie.

Depuis les années 80, l'expansion s'est beaucoup ralentie, bien que la puissance installée augmente très sensiblement chaque année. Entre 1980 et 1985, la production nucléo-électrique a atteint 1 402 TWh, correspondant à une croissance annuelle moyenne de 15,2 %, pour passer à 1 913 TWh entre 1985 et 1990, soit une croissance annuelle de 6,4 %. Entre 1990 et 1994, elle est montée à 2 130 TWh, soit une croissance annuelle de 2,8 % environ. En 1994, les cinq principaux producteurs étaient les Etats-Unis (639,4 TWh), la France (341,8 TWh), le Japon (258,3 TWh), l'Allemagne (143,0 TWh) et le Canada (101,7 TWh).

Dans l'ensemble du monde, le nucléaire assure aujourd'hui environ 17 % de la production totale d'électricité. Dans 14 pays (et à Taiwan, Chine), un quart au moins de l'électricité produite est d'origine nucléaire. La proportion est de 40 % et plus dans les huit pays suivants: Belgique, Bulgarie, France, Hongrie, Lituanie, Slovaquie, Suède et Suisse (voir les Statistiques internationales, page 53).

M. Juhn est directeur de la Division de l'énergie d'origine nucléaire de l'AIEA et M. Kupitz, chef de la Section chargée du développement de la technologie, dans la même division.

A la fin de 1995, 436 unités d'une puissance totale de plus de 343 gigawatts électriques (GWe) étaient en service dans le monde, tandis que 39 unités totalisant plus de 32 GWe étaient en construction. L'expérience d'exploitation de ces centrales représente plus de 6 637 années de réacteur d'une durée utile moyenne d'environ 15 ans. Une expérience non négligeable a été acquise également avec des centrales maintenant déclassées; si l'on en tient compte, l'expérience se chiffre à plus de 7 700 années de réacteur. En d'autres termes, l'énergie nucléaire a atteint sa maturité et s'est solidement implantée dans le secteur de l'électricité.

## Le choc de Tchernobyl

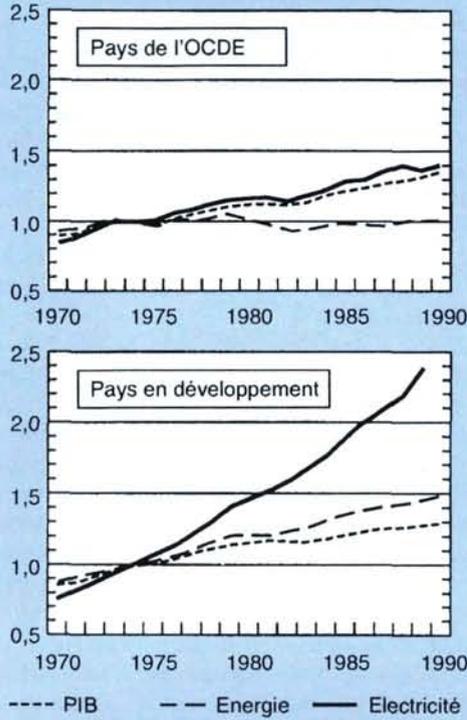
L'évolution récente du secteur peut donner l'impression que le ralentissement de la croissance après la période 1985-1990 est surtout dû à l'accident de Tchernobyl survenu en avril 1986. En réalité, d'autres facteurs sont intervenus et Tchernobyl n'a pas eu le même effet sur toute la planète.

L'un des facteurs était le fléchissement du taux de croissance du secteur électrique dans nombre de pays, pendant la dernière décennie, qui a modulé les adjonctions de puissance installée dans le secteur. Considérant que la construction d'une centrale nucléaire demande entre cinq et huit ans, avec un délai de mise en chantier de un à deux ans (après contrat), l'impact direct de l'accident de Tchernobyl au cours des dix ans est difficile à discerner.

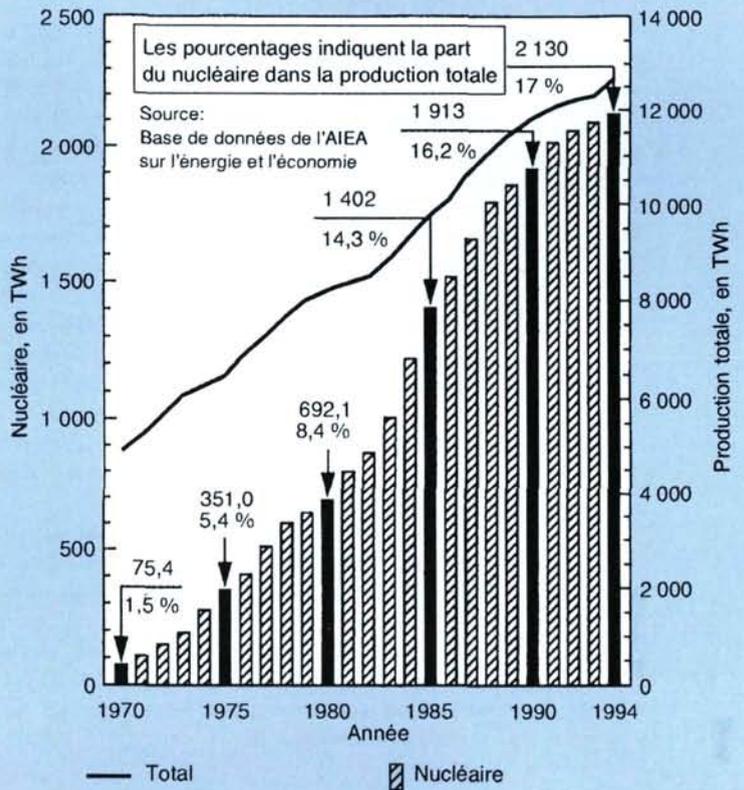
L'accident n'en a pas moins eu des conséquences immédiates dans certains pays. Dans ceux qui exploitaient des réacteurs du type Tchernobyl, les opérations ont été soigneusement contrôlées et des restrictions ont été imposées. Par ailleurs, l'opposition du public a provoqué la mise à l'arrêt temporaire de centrales de types différents, dans d'autres pays. En Italie, la centrale de Caorso a été mise hors service *sine die* et le chantier de la centrale

### Evolution du PIB et de la consommation d'énergie et d'électricité

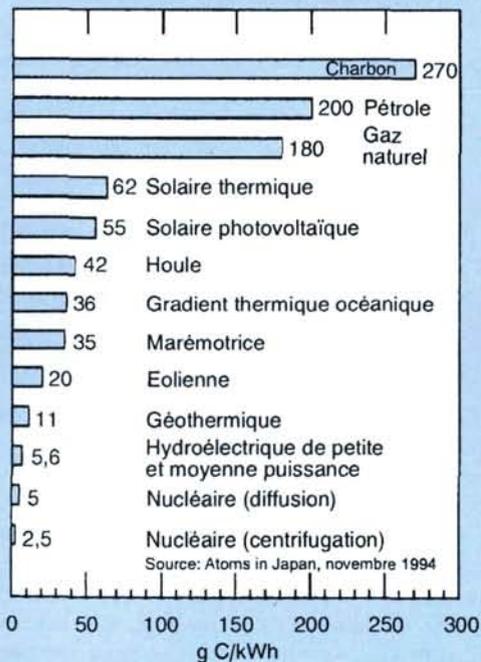
(valeurs par habitant; 1974 = 1)



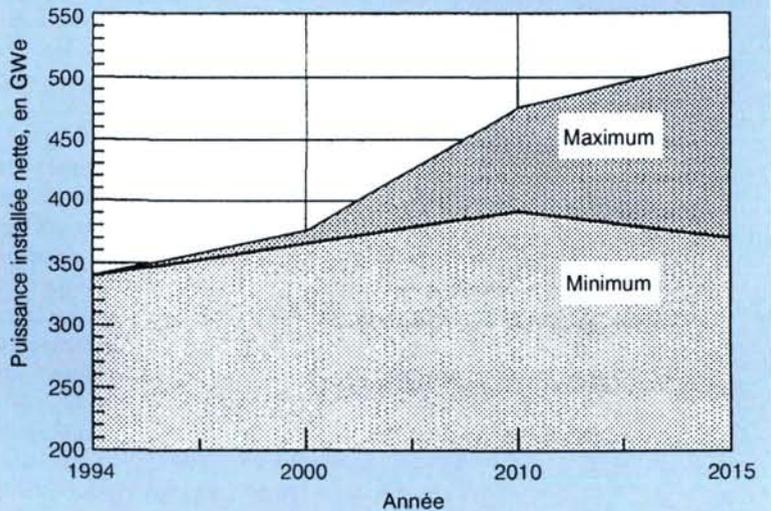
### Augmentation de la production d'électricité nucléaire depuis 1970



### Emissions de CO<sub>2</sub> des chaînes énergétiques complètes de production d'électricité



### Le nucléaire dans le monde jusqu'à l'horizon 2015



La croissance du nucléaire s'est considérablement ralentie au cours des deux dernières décennies, mais elle s'est stabilisée. Les considérations écologiques réveillent l'intérêt pour l'électricité nucléaire, option à faibles émissions de CO<sub>2</sub>.

de Montalto di Castro a été fermé à la suite d'un référendum organisé après l'accident; en Finlande et aux Pays-Bas, les plans de nouvelles centrales nucléaires ont été relégués.

Globalement, l'accident de Tchernobyl est l'une des raisons pour lesquelles l'expansion du nucléaire a été plus ou moins stoppée en Europe; les politiciens n'osent plus prôner cette option comme source d'énergie sûre et propre et les exploitants reculent devant les risques financiers qu'impliquent les conséquences d'un accident grave. La croissance économique des pays européens a été très lente, sinon nulle, et la demande générale d'énergie a très peu augmenté. En revanche, de récentes études montrent que le décor va probablement changer. La consommation d'électricité continue d'augmenter de pair avec la croissance économique, alors même que la consommation totale d'énergie diminue. Dans quelques années, nombre de pays devront augmenter leur puissance installée et compter sans doute en partie sur les centrales nucléaires.

Dans certaines régions d'Asie, la situation est différente car la demande d'énergie grimpe allègrement et le nucléaire apparaît comme une option souhaitable. Nombre de pays de ces régions ont en fait d'ambitieux programmes d'équipement nucléo-électrique pour les prochaines décennies et les fournisseurs du monde entier prévoient un nouvel essor du marché nucléaire.

### Les centrales nucléaires de pointe

Dans certains pays, on se penche beaucoup sur l'étude de centrales nucléaires de pointe. Les modèles de cette nouvelle génération ont été conçus ou sont à l'étude à partir de l'expérience et des leçons apprises dans les centrales en exploitation. On s'attend donc que ces nouvelles centrales de pointe seront encore plus sûres, plus économiques et plus fiables que les précédentes.

Leur conception incorpore généralement des principes de sûreté mieux étudiés, notamment des caractéristiques qui laisseront plus de temps aux opérateurs pour agir et assureront même une meilleure protection contre des rejets éventuels de radioactivité dans l'environnement. On s'efforce aussi de simplifier l'exploitation, l'inspection, la maintenance et la réparation des installations, qui n'en seront que plus fiables et plus économiques.

Deux doctrines sont à considérer: la conception évolutive et la conception novatrice. La première, filiation directe à partir des modèles existants, retient les améliorations et modifications tirées de l'expérience, adopte les nouveautés technologiques et admet la possibilité d'introduire de nouvelles caractéristiques, par exemple des fonctions de sûreté passive. Elle exige tout au plus des essais techniques de confirmation avant d'aborder le marché. La seconde s'écarte beaucoup plus des modèles

existants et requiert par conséquent des essais et des vérifications plus serrés, et peut-être même la construction d'une centrale de démonstration ou d'un prototype avant de passer à la fabrication industrielle.

Les modèles de pointe à l'étude sont de trois types principaux: les réacteurs refroidis et ralentis à l'eau; les réacteurs rapides refroidis par un métal liquide, le sodium par exemple; et les réacteurs refroidis par un gaz, l'hélium par exemple, et ralentis au graphite.

Les trois quarts environ des réacteurs en service, de même que la plupart des modèles de pointe, sont refroidis et ralentis à l'eau. On en distingue deux types: le réacteur à eau légère (LWR) ralenti à l'eau ordinaire, et le réacteur à eau lourde (HWR). Le LWR peut être à eau bouillante (BWR) ou à eau sous pression (PWR).

Voici quelques exemples de grands LWR de pointe: ABWR de General Electric (Etats-Unis); APWR de Westinghouse et Mitsubishi (Etats-Unis, Japon); BWR-90 de ABB Atom (Suède); EPR de Nuclear Power International (NPI), compagnie mixte groupant Framatome de France et Siemens d'Allemagne; SWR (ou BWR) 1000 de Siemens; Système 80+ de ABB Combustion Engineering (Etats-Unis); VVER-1000 (V-392) de Atomenergoproject et Gidropress (Fédération de Russie); et KNGR de KEPCO et KAERI (République de Corée). Pour les moyennes puissances, cinq modèles types: AP-600 de Westinghouse (Etats-Unis); AC-600 de la Société nucléaire nationale (Chine); MS-600 de Mitsubishi (Japon); SBWR de General Electric (Etats-Unis); et VVER-640 (V-407) de Atomenergoproject et Gidropress (Fédération de Russie). Nombre de ces modèles de grande et moyenne puissance sont prêts pour une exploitation industrielle, ou le seront dans quelques années.

La situation est plus incertaine en ce qui concerne les modèles novateurs tels que ISIS d'Ansaldo (Italie); PIUS de ABB Atom (Suède); SPWR de JAERI et IHI (Japon); et VPBER-600 de OKBM (Fédération de Russie). Cela est dû aux essais et vérifications nécessaires et à la charge financière associée.

Les travaux canadiens offrent de beaux exemples de HWR à l'étude: CANDU-3 (environ 450 MWe), CANDU-6 (actuellement 680 MWe) et les projets CANDU (900-1 100 MWe) de l'AECL; citons aussi la nouvelle conception du réacteur indien à eau lourde sous pression (d'environ 500 MWe).

Les réacteurs rapides refroidis par un métal liquide, dits surgénérateurs, sont à l'étude depuis longtemps dans nombre de pays. La conception, la construction et l'exploitation de plusieurs d'entre eux — le BN-600 russe, le Superphénix français de 1 200 MWe et le Monju japonais de 280 MWe — ont permis d'acquérir une expérience constructive de plus de 200 années de réacteur. Ces réacteurs utilisent des neutrons «rapides» pour entretenir la fission et produisent en fait du combustible

à mesure qu'ils en consomment; du fait de la production de plutonium, ils tirent de l'uranium 60 fois plus d'énergie que les réacteurs thermiques. Leur aptitude à produire des matières fissiles sera peut-être un facteur indispensable à longue échéance si le nucléaire reprend son essor au cours des prochaines décennies. Ils peuvent aussi aider à brûler le plutonium et à abrégier le stockage des déchets nucléaires de haute activité en brûlant les radio-isotopes transuraniens de longue période.

Les travaux sur les réacteurs rapides cherchent surtout à améliorer la sûreté et l'économie de l'installation, ainsi que la combustion nucléaire et la technologie du recyclage du combustible, afin de réduire les quantités de déchets radioactifs. Citons ici le BN-800M russe, le DFBR japonais, le PFBR indien, l'EFR européen et le LMR de General Electric, aux Etats-Unis.

Des réacteurs refroidis par un gaz sont en exploitation depuis maintes années. Au Royaume-Uni, la plupart de l'électricité nucléaire est produite par des réacteurs Magnox et des réacteurs de pointe refroidis au CO<sub>2</sub> (AGR). D'autres pays étudient aussi des réacteurs à haute température (HTGR) refroidis à l'hélium et modérés au graphite. Des prototypes ou des modèles de démonstration ont été construits, sans grand succès néanmoins. L'hélium associé à un combustible spécialement conçu fait que ces réacteurs ont des températures de travail très supérieures à celles des réacteurs refroidis à l'eau, de sorte qu'ils peuvent fournir aux turboalternateurs classiques de la vapeur à haute température (et pression) également utile pour certains procédés industriels spéciaux.

On cherche également à améliorer la performance de ce type de réacteur ainsi que sa durée utile. La turbine à gaz en cycle direct fait l'objet d'un effort particulier car elle promet un très haut rendement thermique et des économies d'énergie. Une installation de démonstration pour l'essai d'applications de la chaleur industrielle à haute température est en construction au Japon, et un réacteur d'essai a été mis en chantier en Chine.

### Les perspectives du nucléaire

L'énergie nucléaire ne pourra pas assurer à elle seule une production d'électricité fiable et durable dans le monde, et elle n'est pas non plus le seul moyen de réduire les émissions de gaz à effet de serre qui demeurent la principale préoccupation écologique. Elle est cependant appelée à jouer un rôle essentiel. Les études sur les émissions de CO<sub>2</sub> de différentes chaînes énergétiques produisant de l'électricité indiquent en effet que le nucléaire est une des options les plus propres (voir les graphiques).

La condition préalable indispensable au réveil du secteur nucléaire est l'amélioration des performances techniques et économiques des centrales.

Il faut aussi renforcer la sûreté des installations et donner une solution satisfaisante aux problèmes de la gestion et de l'élimination des déchets.

A l'heure actuelle, l'énergie nucléaire est parmi les sources d'électricité les moins chères dans nombre de pays. Sa marge concurrentielle s'est néanmoins réduite du fait de la baisse des prix des combustibles fossiles et du renchérissement des investissements dans le nucléaire dû aux délais d'obtention des permis et à la durée de la construction. Au cours des dix prochaines années, il est possible qu'une hausse des prix des combustibles fossiles sur le marché, du gaz notamment, et que l'augmentation des coûts d'investissement et d'exploitation des centrales classiques résultant des prélèvements nécessaires pour des raisons écologiques provoquent un renversement de cette tendance. L'avantage économique du nucléaire peut encore s'accroître si les concepteurs parviennent à limiter les dépenses de capital par une rationalisation de la conception, une économie de matériaux et une réduction des délais de construction. De grands progrès sont déjà faits à cet égard et l'on en attend de nouveaux lorsque les réacteurs de pointe seront mis en service.

Le financement des centrales nucléaires demeurera un problème crucial, spécialement dans les pays en développement. Les adaptations technologiques, la mise au point de réacteurs de petite et moyenne puissance et le recours à de nouvelles solutions de financement pourraient alléger ces contraintes financières et faciliter l'expansion du nucléaire.

### Au-delà de l'an 2000

Prévoir le développement du nucléaire n'est pas chose facile. Divers facteurs peuvent influencer sur les politiques et sur le processus de décision, et l'exécution des programmes ne peut être appréciée avec certitude.

Selon les estimations de l'AIEA, la puissance installée nucléaire mondiale qui était de 340 GWe en 1994 atteindra entre 367 et 375 GWe d'ici à l'an 2000. Comme toutes les unités qui seront réceptionnées au début du siècle prochain sont déjà en chantier, la fourchette d'incertitude dépend des retards éventuels de la construction ou de l'obtention des permis. C'est surtout en Asie que de nouvelles centrales seront connectées aux réseaux tandis qu'en Europe occidentale et en Amérique du Nord la puissance installée nucléaire restera pratiquement la même. En Europe orientale, quelques unités en chantier seront achevées, mais la transition économique retardera sensiblement la mise en œuvre des programmes nucléaires dans la plupart des pays.

Ultérieurement, la marge d'incertitude s'élargira à cause d'un certain nombre de facteurs d'ordre technique, économique, écologique et exécutif. Les estimations maximales et minimales de la puissance

installée nucléaire calculées par l'AIEA jusqu'à 2015 sont fondées sur un examen des projets et programmes nucléaires des Etats Membres. Elles procèdent d'hypothèses très différentes mais non extrêmes sur les divers facteurs qui conditionnent l'expansion du nucléaire. Ceux-ci, de même que leur évolution, peuvent varier d'un pays à l'autre. Par conséquent, les projections de l'AIEA n'expriment pas toute la gamme des possibilités futures entre un minimum et un maximum réalisables, mais une possibilité vraisemblable de croissance du nucléaire par région et à l'échelle mondiale.

Dans le cas minimal, on suppose que les obstacles actuels au développement du nucléaire persisteront dans la plupart des pays au cours des vingt prochaines années. Les taux de croissance de l'économie et de la demande d'électricité restent faibles dans les pays industriels. Le public continue de s'opposer au nucléaire et la préoccupation écologique due par exemple au risque d'un changement climatique mondial n'a pas assez de mordant pour forcer les politiques énergétiques à renoncer aux combustibles fossiles au profit de l'énergie nucléaire. Les problèmes institutionnels et financiers bloquent la mise en œuvre des programmes nucléaires prévus, en particulier dans les pays en transition et dans les pays en développement, et l'on ne postule aucun effort énergétique pour adapter et transférer la technologie nucléaire ni pour aider financièrement les pays en développement à mettre en œuvre des projets nucléo-électriques.

Vu ces prémisses plutôt pessimistes, la plupart des réacteurs en construction seront achevés, mais de nouvelles unités ne seront commandées que dans les pays où le nucléaire assume une forte proportion de la production d'électricité; c'est le cas en France, au Japon et en République de Corée. Comme de nombreux réacteurs seront mis à l'arrêt à la fin de leur durée utile prévue, la puissance installée nucléaire dans le monde commencera à diminuer à partir de 2010 et sera à peu près la même en 2015 qu'en l'an 2000, soit quelque 370 GWe. La part du nucléaire dans la production mondiale d'électricité, actuellement de 17 % environ, ne sera plus que de 13 % en 2015.

En revanche, la prévision maximale suppose une reprise modérée de l'équipement nucléaire dont la cause pourrait être, en particulier, une évaluation comparative plus exhaustive des différentes options de production d'électricité, qui prendrait en compte les aspects économiques, sociaux, sanitaires et écologiques. Elle postule que des directives seraient appliquées pour faciliter l'exécution des programmes: renforcement de la coopération internationale, activation de l'adaptation et du transfert des technologies, et création de mécanismes originaux de financement. Dans ces conditions, la puissance installée nucléaire totale dans le monde atteindrait quelque 515 GWe en 2015 et la part du nucléaire dans la production totale d'électricité se situerait autour de 15 %.

Dans les deux cas, la capacité de production de l'industrie nucléaire mondiale serait supérieure à la demande. Une expansion plus rapide du nucléaire serait donc techniquement réalisable et économiquement viable dans plusieurs pays. Toutefois, la réactivation des programmes nucléaires exigerait un changement de politique, dont l'annulation des moratoires *de facto* appliqués dans plusieurs pays et la mise en œuvre de mécanismes pour financer les projets nucléaires des pays en développement, ce qui semble difficilement réalisable à court terme.

### Autres applications de l'énergie nucléaire

Aujourd'hui, seules quelques centrales nucléaires ne sont pas électrogènes (5 GWth seulement, au total, sont réservés à la production d'eau chaude et de vapeur). Le marché potentiel de ces applications pourrait cependant prendre beaucoup d'ampleur. Environ 30 % de l'énergie primaire consommée dans le monde servent à produire de l'électricité, environ 15 % reviennent aux transports et les 55 % restants produisent de l'eau chaude, de la vapeur et de la chaleur. Parmi ces applications non électriques figurent le dessalement, l'eau chaude pour le chauffage urbain, et l'énergie thermique pour les raffineries, l'industrie pétrochimique et la conversion de l'antracite ou du lignite.

Pour ces applications, les températures de travail varient considérablement. Le chauffage urbain et le dessalement de l'eau de mer exigent des températures de 80 à 200°C, les procédés de raffinage du pétrole, des températures de 250 à 550°C. La récupération des pétroles lourds se fait par injection d'eau chaude ou de vapeur, les conditions de température et de pression dépendant avant tout de la structure géologique du gisement, mais la température doit atteindre 550°C et plus. Le traitement des schistes bitumineux et sables pétrolifères exige des températures de 300 à 600°C, l'industrie pétrochimique, des températures de 600 à 880°C. Le raffinage des anthracites et du lignite pour obtenir par exemple du méthanol, combustible utilisé pour les transports, se fait à des températures encore plus élevées qui peuvent atteindre 950°C; enfin, la production d'hydrogène par décomposition de l'eau exige des températures de 900 à 1 000°C.

Les réacteurs refroidis à l'eau peuvent fournir de la chaleur jusqu'à environ 300°C et les réacteurs rapides refroidis par un métal liquide jusqu'à environ 540°C. Les réacteurs refroidis par un gaz vont encore plus loin: les modèles de pointe ralentis au graphite montent à 650°C et les réacteurs à haute température du même type atteignent 950-1 000°C.

On s'intéresse beaucoup à la possibilité d'utiliser les centrales nucléaires pour produire simultanément de l'électricité, de la vapeur et de la chaleur à usage domestique et industriel. Des réacteurs refroidis à l'eau ont déjà été utilisés à cette fin en Allemagne, en Bulgarie, au Canada, en Chine, en Fédération

de Russie, en Hongrie, en République tchèque, en Slovaquie et en Suisse. Un des plus gros producteurs de vapeur industrielle d'origine nucléaire est le Centre nucléaire de Bruce, dans l'Ontario (Canada), dont les réacteurs Candu à eau lourde sous pression peuvent à la fois produire 6 000 MWe d'électricité et livrer de la vapeur et de la chaleur industrielle à Ontario Hydro et à un polygone industriel voisin.

Une étape importante a été franchie en mars 1991 avec la mise en chantier d'un réacteur d'essai à haute température au Centre de recherche d'Oarai de l'Institut japonais d'études atomiques. C'est le premier réacteur du monde qui alimentera un réseau de distribution de chaleur industrielle à haute température.

### **Le nucléaire dans les pays en développement**

La plupart des centrales nucléaires sont implantées dans des pays industriels, mais un certain nombre de pays en développement en possèdent aussi. A la fin de 1995, 73 unités (environ 16 % du total mondial) d'une puissance nette approchant les 45 GWe (environ 13 % de la puissance installée mondiale) étaient en service dans des pays en développement. L'expérience d'exploitation acquise avec ces installations atteint 850 années de réacteur, soit une moyenne de 11 ans d'exploitation par unité.

Le nucléaire s'est donc déjà installé dans les pays en développement et l'on s'attend à un essor assez rapide au cours de la prochaine décennie. Rappelons que plus de la moitié des 39 unités signalées «en chantier» en 1995 sont situées dans des pays en développement.

Par ailleurs, il est fort probable que la demande mondiale d'énergie augmentera sensiblement lors des prochaines décennies. La population mondiale a pratiquement doublé en 30 ans et continuera de croître. On prévoit qu'en 2020 la planète portera huit milliards d'habitants et les pays en développement compteront pour plus de 90 % dans la croissance démographique, tandis que leur consommation d'électricité par habitant, que l'on peut considérer comme un indicateur du niveau de vie, est inférieure de un ou de deux ordres de grandeur à celle des pays industriels.

De surcroît, le coût élevé d'une centrale nucléaire et les difficultés financières sont devenus des obstacles majeurs dans nombre de ces pays. Pour ceux d'entre eux qui disposent d'une infrastructure, de programmes nucléaires et de moyens autochtones de fabrication, la situation n'est pas aussi mauvaise; il leur suffit d'importer des composants, du matériel et des connaissances spécialisés, ce qui limite leurs dépenses de devises.

Toutefois, la plupart ne disposent pas d'infrastructure ni de moyens de production suffisants. De plus, leurs monnaies ne sont généralement pas convertibles de sorte qu'ils sont obligés de contracter de gros emprunts auprès d'établissements financiers

étrangers pour importer la plupart du matériel dont ils ont besoin.

Notons ici que, pour se doter d'une première centrale nucléaire, il est préférable de se la procurer «clé en main», conjointement avec un programme de transfert de la technologie. On s'assure ainsi les meilleures chances de succès pour cette première, ce qui est très important pour faire accepter un programme nucléaire. De plus, le transfert de la technologie doit permettre au pays de se doter progressivement de moyens propres et de développer par la suite la participation nationale à d'autres tranches du programme.

Certains pays en développement, telles la Chine, l'Inde et la République de Corée, ont d'ambitieux projets d'expansion nucléaire et se consacrent activement à l'étude de leurs propres types de réacteurs. La Chine exploite trois unités, dont l'une est de conception chinoise, et en a commandé deux autres de 950 MWe à l'étranger. Elle envisage aussi de mettre en chantier un VVER-1000 et négocie avec l'EACL du Canada la construction de réacteurs CANDU. Le programme pour l'immédiat prévoit la production en série d'une version de 600 MWe du PWR chinois en service à Qinshan, ainsi que son amélioration; la construction à Daqin d'un réacteur de conception chinoise pour le chauffage, et celle d'un réacteur expérimental à haute température.

L'Inde exploite dix réacteurs dont six à eau lourde sous pression de conception indienne, et quatre autres unités sont en chantier. Par ailleurs, un réacteur à eau lourde sous pression de 500 MWe et un réacteur rapide de même puissance, surgénérateur et refroidi au sodium, sont à l'étude.

En République de Corée, 11 réacteurs, tous d'origine étrangère, sont en service. Avec ses unités les plus récentes, le pays aborde une ère nouvelle en mettant en piste le premier d'une série de réacteurs fondés sur le système 80 de ABB Combustion Engineering, dont la conception, l'étude technique et l'équipement sont assurés dans une mesure croissante par des sociétés coréennes. Cinq réacteurs de cette série et d'un autre type sont en chantier et 11 autres sont prévus d'ici à 2006. La prochaine génération de réacteurs est à l'étude et devrait entrer en service en 2006 également.

Quelques autres activités méritent d'être signalées: deux PWR du modèle coréen normalisé sont fournis à la Corée (République populaire démocratique de); l'Egypte envisage de recourir à l'énergie nucléaire; l'Indonésie a la ferme intention de passer au nucléaire dans quelques années; l'Iran (République islamique de) cherche à obtenir une aide pour achever ses réacteurs de Bushehr; le Maroc souhaite entreprendre une étude de faisabilité d'une usine de dessalement de l'eau de mer utilisant de la chaleur nucléaire; le Pakistan construit un PWR de 300 MWe et étudie la possibilité de se doter d'une seconde unité; et la Thaïlande s'intéresse au nucléaire.

### Rôle de l'AIEA dans le développement nucléaire

**Etude des réacteurs de pointe.** Dans un premier temps, le nucléaire a été surtout une entreprise nationale mais, quand il s'agit de réacteurs de pointe, la coopération internationale prend toute son importance et l'AIEA veille à l'encourager. En particulier lorsqu'il s'agit de réacteurs de conception nouvelle, cette coopération peut jouer un grand rôle en ce qu'elle permet de partager ressources et compétences dans des domaines d'intérêt commun et de mieux assumer le coût élevé de la recherche.

Le programme de l'Agence en technologie nucléaire favorise l'échange de données techniques et la coopération entre ceux des Etats Membres qui exécutent de grands programmes d'études de réacteurs. L'Agence assiste les pays Membres qui s'orientent vers des programmes exploratoires ou de recherche et publie des rapports à l'intention de tous les Etats Membres qui s'intéressent aux études en cours. Les activités sont concentrées sur les problèmes essentiels (par exemple, les questions de sûreté, les coûts d'investissement élevés, et les modalités d'exploitation complexes et onéreuses) qui freinent actuellement l'adoption du nucléaire.

Les activités de l'AIEA concernant les réacteurs refroidis à l'eau, par un métal liquide et par un gaz sont coordonnées par trois groupes de travail internationaux dont font partie les directeurs des programmes nationaux relatifs à ces technologies. Chaque groupe de travail se réunit périodiquement à l'échelon mondial pour échanger de l'information et faire le point des programmes nationaux, pour rechercher les domaines d'intérêt commun en vue d'une collaboration, et pour conseiller l'AIEA sur ses programmes et activités techniques. Ces réunions périodiques offrent une tribune libre pour une discussion ouverte de l'expérience d'exploitation et des programmes de développement. Des réunions plus restreintes de spécialistes permettent d'examiner les progrès dans certains domaines techniques d'intérêt commun. Des réunions de comité technique plus étoffées ainsi que des colloques et des ateliers facilitent une plus large participation. Il arrive que les groupes de travail conseillent à l'AIEA d'organiser des programmes coopératifs dans certains domaines afin de grouper les activités sur le plan international. Cette tâche est confiée aux programmes de recherche coordonnée qui durent généralement de trois à cinq ans et comportent souvent des travaux expérimentaux. Ces programmes impliquent une répartition internationale de l'effort, afin de travailler à moindres frais que ne le ferait chaque pays séparément, et de profiter de l'expérience et des connaissances des chercheurs des établissements participants.

**Formation et qualification du personnel des centrales nucléaires.** L'activité de l'Agence dans ce domaine s'est beaucoup développée depuis 1993. On s'efforce surtout de systématiser la formation

du personnel de centrale afin d'améliorer ses qualifications et ses compétences et, partant, la sûreté et la fiabilité de l'exploitation et de la maintenance des installations. Les organismes de réglementation de plusieurs Etats Membres exigent ou recommandent instamment l'adoption de cette approche.

Un groupe de travail international sur la formation et la qualification du personnel de centrale nucléaire a été constitué en 1994 pour donner des avis sur les activités de l'AIEA en la matière et encourager une coopération mondiale. L'assistance de l'AIEA concernant la formation du personnel a nouvellement pris la forme d'un service consultatif organisé à la demande d'un Etat Membre ou d'une centrale nucléaire, et qui fait appel à des experts en formation de divers pays, chargés de fournir des avis et une assistance technique sur tous les aspects de la formation, y compris l'échange d'expérience et de bonnes pratiques.

**Gestion des projets de centrale nucléaire.** L'AIEA assiste ses Etats Membres, sur demande, dans divers domaines concernant l'exploitation de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité de façon économique et sûre. Cette assistance est fournie aux autorités nationales, aux sociétés exploitantes et aux industries qui participent à la planification et à l'exécution de projets nucléaires.

Il importe d'aider les pays Membres en développement à se rendre autonomes pour mettre en place ou améliorer systématiquement toute une gamme d'infrastructures, y compris leur organisation et leur gestion, le transfert d'outils et de méthodes de gestion des projets, et l'exploitation de l'expérience acquise lors de l'exécution de projets réussis.

Il est tout aussi important de disposer de ressources humaines qualifiées pour planifier, réglementer et exécuter un programme nucléaire. Il faut donc assister des programmes visant à créer dans le pays un système indépendant de formation qui réponde aux besoins de l'industrie nucléaire. C'est à cette fin que dix projets relatifs à l'exécution des programmes nucléaires sont mis en œuvre dans huit pays des régions Moyen-Orient, Europe, et Asie et Pacifique.

Pour compléter l'assistance fournie au titre de projets individuels, des cours, ateliers et séminaires ciblés sont organisés sur des sujets choisis en fonction des besoins particuliers de chaque pays. Sur le plan international, des cours de haut niveau sont proposés périodiquement à des participants de toutes les régions. Ils sont porteurs d'un transfert effectif de technologie qui permet de créer un noyau de personnel qualifié dans les pays en développement. Parmi les sujets traités, citons l'amélioration de la gestion des projets, l'assurance de la qualité dans l'exploitation et la maintenance des centrales nucléaires, la formation des opérateurs, et la commande et l'instrumentation des installations.

En Europe orientale, l'Arménie a remis en service une de ses centrales nucléaires; la République tchèque a mis deux réacteurs en chantier; la Roumanie en construit quatre; la Slovaquie en construit aussi quatre, et l'Ukraine en a mis deux en chantier et en prévoit six.

En Amérique latine, l'Argentine et le Brésil construisent un réacteur chacun. L'Argentine étudie aussi un réacteur de conception nationale. Le Mexique exploite deux centrales, mais n'envisage pas sérieusement d'en construire d'autres; au début des années 80, il avait un programme d'équipement nucléaire très ambitieux qu'il a dû abandonner pour des raisons financières. A noter aussi que le Venezuela compte s'équiper de centrales nucléaires mixtes dont la production thermique faciliterait l'extraction des pétroles lourds de la vallée de l'Orinoco.

mation annuelle par habitant est passée de 70 kWh en 1960 à près de 3 200 kWh en 1992.

Au cours des prochaines décennies, la croissance démographique prévue sur notre planète, surtout dans les pays en développement, sollicitera davantage encore l'offre d'énergie et d'électricité. Selon le Conseil mondial de l'énergie, il faut s'attendre à ce que la consommation mondiale d'électricité augmente entre 50 et 75 % d'ici à 2020. Il est certain que l'énergie nucléaire, source sûre et propre d'électricité, est en mesure d'aider les pays à faire face à leurs besoins futurs d'énergie.

### Problèmes et perspectives

Pour juger de l'avenir du nucléaire, il faut considérer la croissance de la demande d'électricité et l'éveil de la conscience écologique. Le nucléaire à lui seul ne peut pas résoudre tous les problèmes, mais il sera présent dans les réponses.

Dans l'immédiat, c'est surtout en Asie que l'on exécutera des projets nucléaires, notamment en Chine, en Corée (République de) et au Japon. Ailleurs dans le monde, la sûreté et la fiabilité des centrales nucléaires, les formules convaincantes de stockage et d'évacuation des déchets de haute activité et la normalisation des formalités d'obtention des permis sont les conditions préalables d'un renouveau du nucléaire.

Aujourd'hui, l'évolution de la consommation d'énergie montre le rôle important que joue l'électricité dans l'effort de modernisation et dans l'amélioration de l'utilisation et du rendement de l'énergie. Il devient aussi évident que, pour participer pleinement à l'essor de l'information et de la communication, il faut pouvoir compter sur l'électricité. Des études font apparaître un rapport certain entre la consommation d'électricité et la performance économique de très nombreux pays. Entre 1960 et 1990, la part de l'électricité dans la consommation mondiale d'énergie est passée de 17 à 30 % et la consommation par habitant a presque triplé, sautant de 765 à 2 225 kWh. Pourtant, 2 milliards d'êtres humains n'ont pas encore l'électricité chez eux.

Dans les prochaines années, nul doute que la consommation par habitant dans les pays en développement devra beaucoup augmenter pour soutenir la croissance économique et améliorer les niveaux de vie. L'urbanisation accélérée, qui permet d'accéder plus aisément aux réseaux de distribution, ainsi que l'électrification des campagnes élargiront le domaine de l'électricité. En République de Corée, où la production nucléo-électrique est importante, la consom-