

Prévisions de la croissance et tendances du développement de l'énergie d'origine nucléaire

La nouvelle génération de réacteurs, née de l'expérience acquise, s'adapte aux besoins d'aujourd'hui

par B. Semenov, P. Dastidar, J. Kupitz, et A. Goodjohn

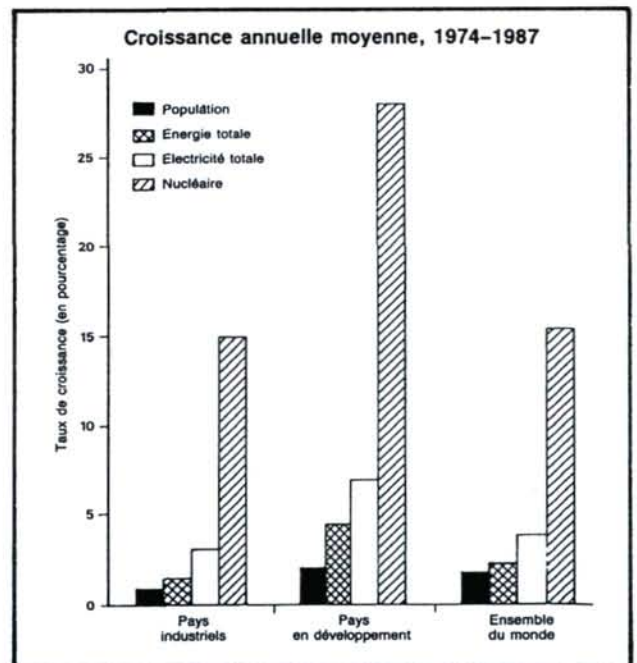
La population mondiale a pratiquement doublé en une trentaine d'années et continue de croître. La consommation mondiale d'énergie a augmenté plus rapidement encore, puisqu'elle a plus que quadruplé pendant la même période. Depuis une quinzaine d'années, cette augmentation de la consommation d'énergie par rapport à l'accroissement démographique est plus rapide dans les pays en développement que dans les pays déjà industrialisés (voir la figure), ce qui montre clairement que les premiers stades du développement impliquent une demande croissante d'énergie par habitant à mesure que le pays s'efforce d'améliorer son économie et le bien-être de ses populations.

Dans les pays industriels, on a constaté que la demande d'énergie était relativement plus élevée jusqu'à la crise du pétrole des premières années 70. Depuis lors, et surtout dans les pays qui dépendent dans une large mesure du pétrole importé, le souci d'économiser l'énergie et de l'utiliser au mieux est devenu quotidien et l'on a constaté d'année en année un fléchissement de l'accroissement de la consommation et même, dans certains pays, une diminution. Dans l'ensemble, la tendance reste malgré tout à l'augmentation et l'on pense qu'elle persistera.

D'autres phénomènes intéressants se sont produits. La consommation totale d'électricité, tant dans les pays industriels que dans les pays en développement, a continué d'augmenter indépendamment des crises de l'énergie et à des taux toujours supérieurs à ceux de la consommation totale d'énergie. Au cours des 15 dernières années, la consommation d'électricité a augmenté de près de 7% par an dans les pays en développement, tandis qu'elle n'augmentait que de 3% dans les pays industriels, au lieu de quelque 7% par an avant la crise pétrolière des années 70. Si la consommation mondiale d'électricité continue d'augmenter à ce rythme, comme on peut s'y attendre, les sources d'énergie classiques qui alimentent les centrales hydroélectriques et les centrales thermiques ne tarderont pas à tarir. Or, n'oublions pas

que les combustibles fossiles — le charbon, le pétrole, et le gaz naturel —, qui assurent actuellement près des deux tiers de la production mondiale d'électricité et sont responsables pour une bonne part de la pollution de l'environnement de plus en plus préoccupante, ont maints autres usages pour lesquels il est plus difficile de les remplacer.

Il faut donc disposer de sources d'énergie non fossiles et c'est là que l'option nucléaire peut intervenir de façon positive. En réalité, pour l'avenir immédiat et en attendant que les technologies dites douces fassent une percée — par exemple que les cellules photovoltaïques deviennent rentables ou que les systèmes à fusion tiennent finalement leurs promesses — la fission nucléaire et les combustibles fossiles (essentiellement le charbon) sont les seules options vraiment viables que l'on puisse considérer.



M. Semenov est le directeur général adjoint chargé du Département de l'énergie et de la sûreté nucléaires de l'AIEA; M. Dastidar est directeur de la Division de l'énergie d'origine nucléaire; M. Kupitz est un cadre de cette division et M. Goodjohn y travaille en qualité de consultant.

Perspectives

SITUATION DES TRANCHES NUCLEO-ELECTRIQUES (données préliminaires au 31 décembre 1988)

	En service		En construction		Durée totale de fonctionnement (jusqu'au 31 décembre 1988)	Electricité produite par les réacteurs nucléaires en 1988	
	Nombre de tranches	Total MWe	Nombre de tranches	Total MWe		Années — mois	TWe-h
Argentine	2	935	1	692	20-7	5,1	11,2
Belgique	7	5 480			86-7	40,6	65,5
Bésil	1	626	1	1 245	6-9	0,6	0,3
Bulgarie	5	2 585	2	1 906	43-8	16,0	35,6
Canada	18	12 185	4	3 524	206-0	78,2	16,0
Chine			3	2 148			
Cuba			2	816			
Tchécoslovaquie	8	3 264	8	5 120	44-1	21,7	26,7
Finlande	4	2 310			39-4	18,4	36,0
France	55	52 588	9	12 245	488-1	260,2	69,9
République dém. allemande	5	1 694	6	3 432	72-5	10,9*	9,9
Allemagne, Rép. féd. d'	23	21 491	2	1 520	279-3	137,8	34,0
Hongrie	4	1 645	2		14-2	12,6	48,9
Inde	6	1 154	8	1 760	72-8	5,4	3,0
Iran, Rép. islamique d'			2	2 392			
Italie	2	1 120			77-10		
Japon	38	28 253	12	10 931	394-0	167,8*	23,4
Corée, République de	8	6 270	1	900	36-4	38,0	46,9
Mexique			2	1 308			
Pays-Bas	2	508			35-9	3,5	5,3
Pakistan	1	125			17-3	0,2	0,6
Pologne			2	880			
Roumanie			5	3 300			
Afrique du Sud	2	1 842			8-3	10,5	7,3
Espagne	10	7 519			82-7	48,3	36,1
Suède	12	9 693			135-2	66,3	46,9
Suisse	5	2 952			68-10	21,5	37,4
Taiwan, Chine	6	4 924			44-1	29,3*	41,0*
Royaume-Uni	40	11 921	2	1 833	810-10	55,5	19,3
Etats-Unis d'Amérique	108	95 273	7	7 689	1261-10	526,9	19,5
URSS	56	33 833	26	21 230	687-2	215,7	12,6
Yougoslavie	1	632			7-3	3,9	5,2
Total mondial	429	310 812	105	84 871	5040-9	1794,4	

* Estimations. Source: AIEA PRIS.

Situation de l'énergie d'origine nucléaire

Malgré les problèmes bien connus, la production nucléo-électrique a fait un grand pas en 1988 pour répondre à l'accroissement de la demande mondiale d'électricité, comme le montre le répertoire des centrales nucléaires en exploitation et en construction à la fin de 1988, établi par le Système de documentation de l'AIEA sur les réacteurs de puissance (PRIS) (voir le tableau).

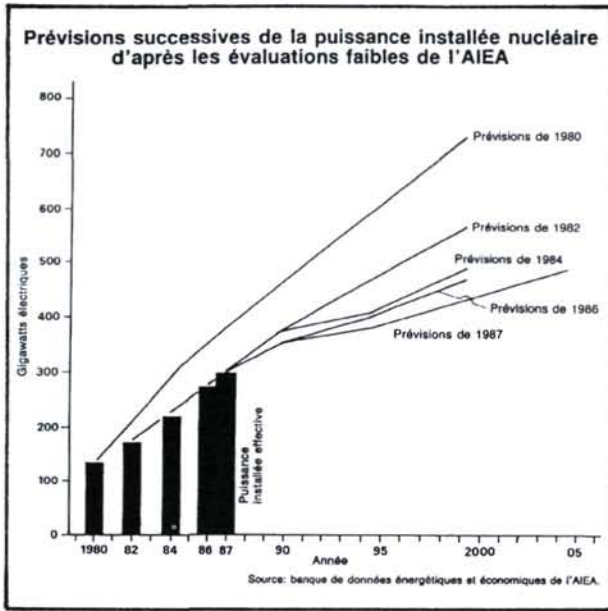
En 1988, 14 nouveaux réacteurs de puissance sont entrés en service dans huit pays, ce qui fait un total mondial de 429 centrales nucléo-électriques. A la fin de l'année, 26 pays produisaient de l'électricité d'origine nucléaire et la puissance installée nucléaire totale avait augmenté de 12 gigawatts électriques; elle dépasse maintenant 310 gigawatts.

Les pays qui ont mis en service de nouveaux réacteurs de puissance en 1988 sont les suivants: France (2), Japon (2), République fédérale d'Allemagne (2), République de Corée (1), Espagne (1), Royaume-Uni (3), Etats-Unis (2), et URSS (1). Dans 11 des 26 pays mentionnés, plus d'un tiers de la production totale d'électricité est assuré par le parc nucléaire. Cette même année, les 429 réacteurs en exploitation dans le monde ont produit près de 1800 térawatts-heure (TWh), soit environ 17% de la production mondiale actuelle, chiffre

qui représente la totalité de la production de 1957 à partir de toutes les sources d'énergie.

En d'autres termes, la production nucléo-énergétique a augmenté dans des proportions phénoménales au cours des 15 dernières années. Tandis que, dans le même temps, la consommation d'électricité dans les pays industriels augmentait de 3% par an, la part du nucléaire augmentait, elle, de 15%. Dans les pays en développement, l'augmentation de la consommation d'électricité a été encore plus rapide, atteignant 6,9% par an pendant cette même période, alors que la production d'origine nucléaire augmentait parallèlement de 28%. Il est intéressant de noter que tous les pays en développement du monde sont à l'heure de l'électrification, avec toutes les commodités qu'elle procure, et que, de ce fait, leur consommation d'électricité augmente plus que leur consommation totale d'énergie alors qu'ils n'exploitent pas encore l'énergie nucléaire.

L'avenir. Il est devenu très difficile de prédire l'évolution de la production nucléo-électrique. Le passé ne peut se projeter dans l'avenir, certainement pas dans l'immédiat, tout au moins. Pour les raisons que nous savons, l'augmentation de la consommation d'électricité des pays industriels a fléchi depuis une dizaine d'années et plus, avec pour conséquence l'annulation ou le report de nouvelles tranches nucléaires, entre autres choses à



cause de l'inquiétude irrationnelle que suscite le nucléaire. Pour l'ensemble du monde, les taux de croissance réels ont toujours été inférieurs aux prévisions successives (voir la figure). On peut constater que les prévisions de la puissance installée pour l'an 2000 sont constamment revues à la baisse, dans une moindre mesure néanmoins pour ce qui est des dernières estimations. En tout, l'augmentation prévue pour l'an 2000 a été réduite de 300 gigawatts entre 1980 et 1987. Vu les longs délais nécessaires à l'exécution d'un projet de centrale nucléaire — planification, homologation, construction et mise en service — les nouvelles tranches qui seront mises en exploitation dans un avenir proche (jusque vers la fin du siècle) seront pour la plupart le résultat de décisions déjà prises, quoique les délais de construction, d'homologation ou les orientations de principe puissent encore être modifiés. En revanche, la situation après l'an 2000 est moins prévisible.

D'après les prévisions faibles faites par l'AIEA en 1987, on a évalué les taux de croissance de la puissance installée nucléaire et les pourcentages de l'apport nucléo-électrique dans les pays industriels et les pays en développement jusqu'en 2005 (voir la figure). L'augmentation prévue de la puissance installée nucléaire qui passerait de 298 gigawatts en 1987 à 503 en 2005 correspond à un taux moyen de croissance annuelle de 3% et à une augmentation totale de 205 gigawatts.

Sur ce total, 153 gigawatts reviennent aux pays industriels, soit une croissance annuelle moyenne de 2,5%, ce qui est à peu de chose près l'augmentation prévue pour la consommation d'électricité. Autrement dit, étant donné les problèmes associés au nucléaire et, il faut bien l'admettre, l'exagération des prévisions de l'augmentation de la consommation d'électricité dans les années 70, on estime aujourd'hui que la part du nucléaire augmentera à peu près dans les mêmes proportions que la production totale d'électricité. De fait, on estime que cette part se stabilisera à 15% de la puissance installée, à partir de 1995, et s'y maintiendra pendant le reste de la période considérée. Toutefois, comme les centrales nucléaires seront davantage utilisées pour

assurer la charge de base, on pense qu'elles assumeront quelque 23% de la consommation totale entre 1995 et 2005.

Parallèlement, on s'attend que la puissance installée nucléaire des pays en développement atteindra 72 gigawatts en 2005, soit une augmentation de 51 gigawatts à raison d'un taux de croissance de 7,1% par an en moyenne. Contrairement à ce qui se passe dans les pays industriels, il semble que le parc nucléaire des pays en développement croîtra plus rapidement que leur puissance installée totale, dont il représentera 5,3% en 2005. C'est pourquoi il est probable que les pays en développement compteront pour 25% dans l'augmentation générale de la puissance installée qui sera mise en service d'ici là dans le monde.

En 2005, les centrales nucléaires représenteront environ 12% de la puissance installée mondiale, chiffre sensiblement inférieur à ce que l'on pensait il y a une dizaine d'années, mais raisonnable vu la situation et les tendances actuelles. Le revers de la médaille c'est que, pour répondre à la demande totale d'électricité actuellement prévue, la production d'électricité à base de combustible fossile, dont essentiellement le charbon, devra être multipliée par 1,8 d'ici 2005, ce qui n'est pas souhaitable pour l'environnement. Aussi est-il probable que la recommandation pressante de la Conférence de Toronto de 1988 visant à réduire les émissions de CO₂ à 80% de leur niveau actuel restera sans suite.

Les enseignements du passé. Il ne faudra surtout pas négliger l'expérience acquise si l'on veut que l'énergie d'origine nucléaire reprenne une place prépondérante dans l'augmentation de la puissance installée dans l'ensemble des pays industriels, entretienne et accélère, il faut l'espérer, la croissance des pays en développement et prépare la voie de l'option nucléaire pour un certain nombre de pays qui ne l'ont pas encore choisie.

Dans ce contexte, les accidents survenus dans les centrales nucléaires de Three Mile Island et de Tchernobyl présentent un intérêt tout particulier car ils ont amené tous les pays qui exploitent des centrales nucléaires à reconsidérer les caractéristiques de sûreté fondamentales de leurs installations respectives. Le premier de ces accidents, quoique relativement bénin quant à ses effets sur la population, a mené à plusieurs améliorations de la technologie de la sûreté et de la fiabilité. Il a aussi révélé que l'instrumentation en usage pouvait être responsable d'une interprétation erronée de l'état d'un réacteur. La formation des opérateurs était par ailleurs insuffisante pour leur permettre d'interpréter les événements inattendus. Les perfectionnements apportés aux simulateurs ont permis de donner une formation plus rigoureuse aux opérateurs, notamment par la simulation de ces événements. Des améliorations ont également été apportées à l'instrumentation, ce qui a permis aux opérateurs d'obtenir une information mieux formulée. Ce problème de l'interface homme-machine, comme on l'appelle communément, est constamment à l'examen. Quant à l'accident de Tchernobyl, ses effets sur le public et ses conséquences internationales ont été plus graves. Il a amené les autorités soviétiques à réexaminer à fond leur programme nucléaire et les caractéristiques de leurs futures centrales.

Indépendamment de leurs divers effets sur le public, ces deux accidents ont causé d'énormes pertes de capi-

taux et de revenus et entraîné de grosses dépenses de décontamination, dont il faut tirer la leçon: il est indispensable, de toute évidence, de veiller dorénavant davantage à protéger les investissements et l'économie des centrales nucléaires.

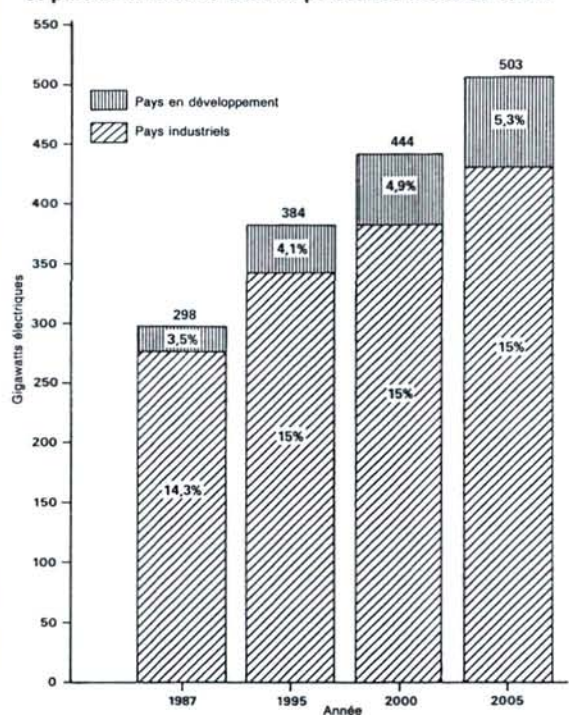
La fiabilité d'une installation et son corollaire, la disponibilité, c'est-à-dire le rapport de l'énergie disponible pendant une période donnée au produit de la puissance maximale par la durée de cette période, sont des facteurs clés qui appellent un réexamen. De fait, le facteur de disponibilité a été considérablement amélioré au cours des dix dernières années. En 1977, il n'était que de 64,7 % pour les 137 réacteurs de puissance du fichier de l'Agence; en 1982, le nombre des réacteurs considérés était passé à 200, mais le facteur de disponibilité moyen se situait toujours aux alentours de 65%, ce qui était préoccupant. En 1987, il atteignait 71,4% pour les 346 réacteurs de la liste. Il est encore plus significatif que 42% de ces réacteurs fonctionnaient à un facteur charge de 80% ou plus. Cette performance devrait évidemment être maintenue.

Dans ce même contexte, et grâce aux études probabilistes de la sûreté qui consistent à calculer la probabilité de défaillance des composants et des systèmes pour en déduire la probabilité globale d'une séquence de défaillances, les maillons faibles des chaînes de sûreté ont été déterminés et l'on a pris des dispositions pour améliorer l'ensemble. Les défaillances humaines ont également été analysées par des méthodes analogues. Il en est résulté une forte diminution du nombre d'interventions des systèmes de sûreté.

Un autre élément a acquis une importance capitale pour l'avenir, c'est le problème de la taille. Vu la forte intensité de capital qu'exige une centrale nucléaire, les grands pays industrialisés ont fait étudier des centrales de plus en plus puissantes, comptant ainsi réduire les dépenses d'investissements par unité d'énergie produite. Ces extrapolations ont non seulement abouti à des complications en ce sens qu'il a fallu multiplier les composants et développer l'instrumentation et les circuits de commande, mais ont aussi créé des exigences nouvelles sur le plan de l'exploitation et de la maintenance. Or, une simplification des systèmes permettrait non seulement de réduire le nombre de défaillances humaines au niveau de l'exploitation et de la maintenance, améliorant ainsi la sûreté, mais également de réduire les dépenses d'investissements. Certains concepteurs sont d'ailleurs convaincus que la simplification, la haute qualité intrinsèque, l'exploitation plus systématique des phénomènes naturels aux fins de la sûreté et une économie rationnelle sont parfaitement réalisables dans une installation de moindre puissance. Il s'avère qu'il existe un marché pour ce type de centrale, tant pour équiper les nombreux pays en développement qui choisiront l'option nucléaire dans l'avenir que pour adapter la production nucléo-électrique de certains pays industriels où l'accroissement de la demande d'énergie semble faiblir. Le résultat des études entreprises par l'AIEA en 1983 sur les centrales nucléaires de petite et moyenne puissance abonde dans ce sens.

Un autre argument qui milite en faveur des centrales de ce type est la possibilité de les utiliser dans l'avenir pour produire seulement de la chaleur, à faible température pour le chauffage urbain ou à haute température

Augmentation prévue de la puissance installée nucléaire jusqu'en 2005 (d'après les évaluations faibles de l'AIEA) et part du nucléaire dans la puissance installée totale



Source: banque de données énergétiques et économiques de l'AIEA.

pour l'industrie. Les problèmes que poseront les émissions de gaz à effet de serre au cas où les centrales thermogènes à combustible fossile seraient maintenues en activité rendront plus évidente encore la nécessité de faire appel au nucléaire pour cette production dans un avenir relativement proche. Ce marché demande des petites unités desservant des réseaux relativement peu étendus.

Les conditions du succès. L'expérience acquise avec les centrales nucléaires permet de dégager un cadre dans lequel s'inscrira la production nucléo-énergétique de l'avenir. La structure de cette production comporte plusieurs éléments:

- centrales de grande puissance dans les pays industriels où la charge, l'augmentation de la consommation et le réseau de distribution le justifient;
- centrales de petite et moyenne puissance dans le cas contraire et en vue d'autres applications que la seule production d'électricité;
- sûreté mieux étudiée, indépendamment de la taille de la centrale, prolongation des délais d'intervention, caractéristiques passives et possibilités d'intervention de l'homme, si nécessaire, dans les situations critiques; en outre, prévoir des marges d'exploitation suffisantes afin que les systèmes de sûreté ne soient que rarement sollicités; la réduction du risque économique peut être considéré comme faisant partie de cet ensemble;
- normalisation plus poussée et simplification des installations, ce qui permet d'améliorer les calendriers, l'économie et la fiabilité, de simplifier l'exploitation, d'améliorer l'interface homme-machine, de centraliser les services, de faciliter les échanges internationaux et de mieux maîtriser la situation; il faut aussi prévoir un

dispositif réglementaire bien adapté capable d'intervenir rapidement sans pour autant perdre de son efficacité;

- meilleure utilisation des ressources, bouclage du cycle du combustible et gestion rationnelle des déchets.

Pour maintenir cette structure en place, la recherche de l'excellence devrait être à l'ordre du jour dans toute centrale et dans toute activité, car elle est la clé de l'effort humain pour relever le profil de la croissance nucléaire.

Tendances du développement nucléo-énergétique

Une attention croissante est accordée à ce schéma non seulement par les gouvernements et les groupements industriels des pays déjà pourvus d'une bonne infrastructure nucléo-énergétique, mais aussi par ceux qui envisagent sérieusement de développer ou de créer leur parc nucléaire. L'évolution de la conception des réacteurs est nettement influencée par l'expérience acquise et par ce schéma révisé qui vaut pour l'avenir.

Réacteurs à eau légère. La technologie actuelle du réacteur à eau légère (LWR) a fait ses preuves: elle est économique, sûre et fiable. La plupart des pays industriels continuent d'étudier des modèles de pointe de grande puissance — au-delà de 900 MWe — pour les années 90. Ces réacteurs avancés (ALWR) sont l'aboutissement des améliorations et des perfectionnements qui n'ont cessé d'être apportés aux réacteurs en service. Le modèle N4 (1400 MWe), par exemple, actuellement construit en France, est dérivé directement du modèle P4 normalisé (1300 MWe), mais il revient 5% moins cher par kilowatt installé que le dernier. En République fédérale d'Allemagne, la série «Convoy» se compose de trois réacteurs à eau sous pression de 1300 MWe. Dans leurs cas, les améliorations intéressent surtout la construction de la centrale, au niveau de l'ingénierie et de la gestion du projet. Le réacteur VVER-1800 est à l'étude en URSS à partir d'une version améliorée du VVER-1000 plus sûr et plus rentable. Le réacteur avancé à eau sous pression (APWR-1350 MWe) de la Westinghouse-Mitsubishi, le réacteur britannique à eau sous pression «Sizewell-B» de 1250 MWe, le «System 80 Plus» de la Combustion Engineering (3800 MWth) et le réacteur à eau bouillante (ABWR-1360 MWe) de General Electric-Hitachi-Toshiba sont autant d'exemples de filières avancées de grande puissance actuellement à l'étude. Tous ces modèles bénéficient d'un certain nombre d'améliorations: perfectionnements techniques et opérationnels, performance du combustible et combustion nucléaire supérieures, rationalisation de l'interface homme-machine grâce à l'informatisation et au perfectionnement des systèmes d'affichage, normalisation plus poussée, relèvement des qualifications des opérateurs et formation sur simulateurs. Il en résulte une amélioration progressive des facteurs de disponibilité et une moindre sollicitation des systèmes de sûreté.

Aux Etats-Unis, le programme conjoint de l'Institut de recherche sur l'énergie électrique et du Département de l'énergie témoigne d'une conception différente du développement progressif. Un répertoire complet des desiderata des exploitants a été constitué et l'étude d'un réacteur à eau légère comportant les améliorations proposées se fera sur 3 ans avec la participation de

l'industrie. Un modèle de grande puissance et un modèle de faible puissance (600 MWe ou moins) sont prévus, ce dernier devant comporter en particulier des caractéristiques de sûreté passive. L'homologation de la conception par les autorités compétentes est la clé de ce programme qui prévoit que ces réacteurs pourront être offerts sur le marché dans les années 90 sans qu'il soit nécessaire d'en faire au préalable la démonstration. Le modèle AP-600 (avancé passif de 600 MWe) à eau sous pression, le SBWR (réacteur simplifié à eau bouillante) et le SIR (réacteur de sûreté intégral), également à eau sous pression, sont tous dotés de meilleures caractéristiques de sûreté passive. Le SIR a été mis au point conjointement par Combustion Engineering et Stone et Webster, aux Etats-Unis, en collaboration avec Rolls-Royce et l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni.

Une approche plus radicale est adoptée par le bureau d'études du réacteur PIUS (ABB-Atom) et le projet ISER (Université de Tokyo). Ces réacteurs sont fondés sur le principe que la mise à l'arrêt et l'évacuation de la chaleur de désintégration du cœur, après un accident, doivent être assurées uniquement de manière passive. Ces modèles comporteront plusieurs caractéristiques nouvelles de conception entièrement passive, qui n'exigent donc aucune intervention de l'opérateur, et dont le fonctionnement est garanti par des lois physiques indiscutables. L'étude de ces modèles, tant à eau bouillante qu'à eau sous pression, essentiellement dans la gamme des petites puissances, en est à ses débuts pour la plupart d'entre eux, et il faudra probablement faire la preuve de la validité des principes appliqués avec une installation de démonstration. Ces modèles tarderont donc un peu plus à faire leur apparition sur le marché.

Etant donné que la fabrication en série des réacteurs surgénérateurs se fait attendre, surtout à cause de leur prix, l'exploitation rationnelle des ressources d'uranium est devenue un facteur de l'évolution des réacteurs à eau légère. Certains perfectionnements mineurs apportés aux réacteurs à eau actuels pourraient fort bien permettre d'améliorer l'exploitation de ces ressources. On pourrait envisager le recyclage du plutonium ou encore modifier les caractéristiques du cœur de manière à augmenter sensiblement le rendement du combustible. Certaines de ces améliorations ne comporteraient pas un grand risque économique et pourraient se faire sans difficulté et rapidement. La validité technico-économique et la sûreté des installations à l'étude seront bientôt confirmées par les études et les réalisations en cours aux Etats-Unis, au Japon, en République fédérale d'Allemagne et, plus spécialement, en France. Bon nombre de ces modifications, une fois agréées, pourront être apportées aux réacteurs actuels dans les trois à cinq prochaines années.

Réacteurs à eau lourde. Deux filières de réacteurs industriels refroidis à l'eau lourde sous pression (HWR) sont au point. Tant la version à tube de force que celle à cuve hermétique ont donné entière satisfaction dans plusieurs pays. Ils existent dans les gammes de puissance de quelques centaines de MWe jusqu'à 900 MWe. Le facteur de disponibilité de la plupart d'entre eux pendant leur durée utile est parmi les meilleurs de tous les réacteurs industriels. Leur performance en ce qui concerne la sûreté s'est également avérée excellente. Ils ont également tenu leurs

promesses d'économies sur le combustible grâce au bilan neutronique inhérent à l'emploi de l'eau lourde comme modérateur. Ce bilan neutronique favorable, qui est le propre de ces réacteurs, permet d'envisager plusieurs cycles du combustible: uranium faiblement enrichi, uranium récupéré du combustible LWR (synergie LWR/HWR), plutonium de recyclage, et thorium à haut facteur de conversion, dont la plupart sont à l'étude notamment au Canada, dans le cadre d'un programme permanent.

Ces études cherchent essentiellement à réduire le coût des installations et à améliorer progressivement leur performance et leur sûreté. Les travaux portent sur un réacteur de 500 MWe, en Inde, sur plusieurs réacteurs canadiens, dont le Candu-3 de 480-MWe et le Candu-6 MK2 de 800-MWe, et sur l'Argos de 380 MWe étudié conjointement par un bureau d'études argentin et la firme Siemens.

Réacteurs refroidis par un gaz. Avec l'achèvement des centrales Heysham-2 et Torness, au Royaume-Uni, le programme de réacteurs avancés refroidis par gaz (AGR), dont le Royaume-Uni est le promoteur, semble être parvenu à terme. La suite des travaux sur cette filière refroidie à l'anhydride carbonique consistera surtout à en améliorer la performance et à prolonger la durée utile des exemplaires en service.

L'étude du réacteur à haute température refroidi à l'hélium (HTGR) se poursuit aux Etats-Unis, en République fédérale d'Allemagne, en URSS et au Japon. L'effort porte principalement sur des petites unités modulaires de 80 à quelque 150 MWe, délaissant un peu, pour le moment, les modèles plus puissants, tels celui de Fort St. Vrain (330 MWe), aux Etats-Unis, et le THTR (300 MWe) de la République fédérale d'Allemagne. La raison de ce choix réside uniquement dans le résultat de l'examen critique des exigences de la nouvelle structure des parcs nucléaires. La formule modulaire a la préférence, car elle permet de recourir au maximum à la fabrication en usine, au lieu de la construction sur place, d'où un meilleur contrôle de la qualité, un abrègement des calendriers et une réduction des coûts. Le rendement énergétique du module et la configuration du cœur ont été délibérément fixés en fonction des critères de sûreté et de protection de l'investissement (plus stricts que ceux appliqués jusqu'alors à tous les autres types de réacteurs), lesquels impliquent des systèmes entièrement passifs étroitement associés au cœur du réacteur. Le traitement indépendant de ces systèmes moins nombreux réalisés conformément aux normes nucléaires, alors que le reste de la centrale peut être construit selon les normes classiques habituelles, vise à réduire sensiblement les coûts.

Les caractéristiques du HTGR qui permettent de lui conférer ces qualités sont l'innocuité de l'hélium utilisé comme fluide de refroidissement, la masse importante du graphite utilisé comme modérateur (d'où la faible puissance volumique) étroitement associée au combustible, le coefficient de puissance constamment négatif et, surtout, le combustible lui-même qui se présente sous forme de petites particules revêtues de plusieurs couches de matières céramiques. Le combustible, de même que le graphite, peut supporter sans dommage de très hautes températures. Ce réacteur est le seul qui puisse résister à une perte totale de fluide de refroidissement.

Après 30 ans ou presque d'études et de pratique, les caractéristiques fondamentales et les performances techniques du réacteur à haute température refroidi par gaz (HTGR) sont bien connues. Néanmoins, du fait des particularités de sa formule modulaire, il faudra probablement procéder à une démonstration avant d'en demander l'homologation et de la commercialiser, et l'on travaille dans ce sens aux Etats-Unis, en République fédérale d'Allemagne et en URSS. Vu la taille relativement modeste de l'unité, on peut envisager de faire la démonstration avec un seul exemplaire quitte à construire par la suite une centrale plurimodulaire de taille industrielle. Un des avantages certains de cette conception est que l'on peut agrandir progressivement une même centrale en y ajoutant les modules nécessaires pour répondre à la demande. Cette possibilité, jointe à la simplicité relative de la conception, pourrait bien faire du réacteur modulaire un bon candidat à l'exportation vers les pays faibles consommateurs d'électricité dont l'infrastructure est encore insuffisante.

Le programme HTGR du Japon, tout en reconnaissant que cette filière peut produire de la vapeur de qualité supérieure et de l'électricité avec un meilleur rendement, cherche surtout à obtenir des températures de sortie de l'hélium encore plus élevées (jusqu'à 1000°C) en vue de multiplier les applications possibles de la chaleur industrielle produite. Un petit réacteur d'essai de 30 MWe est en construction au Japon avec cet objectif en vue.

Réacteurs à métal liquide. Le réacteur rapide à métal liquide (LMFR) utilisé comme surgénérateur ou pour produire de l'électricité n'a pas obtenu le succès que l'on attendait, car il existe des ressources d'uranium à des prix intéressants et suffisantes pour répondre à la demande à court et à moyen terme. On sait néanmoins, dans les pays industriels, qu'il faudra faire appel aux surgénérateurs au cours des premières décennies du siècle prochain, en particulier si le nucléaire reprend son essor.

Dans l'intervalle, l'expérience de 200 années de réacteur que l'on a acquise avec les modèles expérimentaux et de moyenne puissance continuera de s'enrichir. Les études de conception de spécimens de pointe se poursuivent compte dûment tenu du schéma révisé d'exploitation de la nouvelle génération de centrales nucléaires. L'on continue également de travailler sur le cycle du combustible en cherchant en particulier à prolonger la combustion nucléaire et à démontrer que l'on peut boucler le cycle. Ces travaux portent principalement sur l'oxyde mixte, mais certains résultats récemment obtenus aux Etats-Unis avec des combustibles trimétalliques (U-Pu-Zr) et le pyrotraitement de ces combustibles une fois épuisés semblent très prometteurs. Une des particularités intéressantes de ce traitement est que la majorité des actinides de longue période qui accompagnent le plutonium dans le processus peuvent ensuite être recyclés et disparaître ainsi du courant de déchets.

En Europe, au Japon, en URSS et en Inde, les études de conception portent traditionnellement sur les grandes unités alimentées en combustible au mélange d'oxydes. En Europe et en URSS par exemple, les concepteurs

travaillent sur des unités de 1500 à 1600 MWe en développant les caractéristiques des composants, de l'installation et du cycle du combustible à partir des bons résultats obtenus avec Phénix et Superphénix en France, PFR au Royaume-Uni, et BN-350 et BN-600 en URSS, et cherchent actuellement, en particulier, à mieux exploiter le principe de la sûreté passive. Au Japon et en Inde, on s'occupe surtout des réacteurs de moindre puissance qui représenteront le prochain stade de l'évolution. Lorsque le prototype Monju de 280 MWe aura divergé en 1992, comme on le prévoit, le Japon passera à des modèles de 800 à 1000 MWe. A partir de son surgénérateur rapide d'essai, l'Inde étudie un prototype intégré de 500 MWe.

Après l'abandon du surgénérateur de Clinch River (Etats-Unis) au début des années 80, le programme du réacteur à métal liquide s'est lancé dès le début dans l'étude de conceptions nouvelles. Le gros de l'effort porte désormais sur une formule de type modulaire (PRISM) conçue par General Electric. Chaque unité électrogène du système envisagé se compose de trois modules de 471 MWth alimentant un seul turbo-alternateur de 465 MWe. Le système comporte de nombreuses innovations, dont l'emploi d'un cycle de combustible trimétallique, l'arrêt automatique du réacteur commandé par les paramètres de température et de réactivité, l'évacuation spontanée de la chaleur de désintégration, et toutes les autres caractéristiques structurelles et opérationnelles propres aux formules modulaires de faible puissance. Le programme en est au stade de la conception et des formalités de préhomologation en vue d'obtenir l'homologation définitive après une série d'essais avec un prototype de module en grandeur réelle.

Conclusions

La tendance à l'augmentation de la consommation mondiale d'électricité mène aux conclusions suivantes:

- L'électricité se présente comme l'option énergétique la mieux adaptée aux besoins de l'avenir. Les raisons en sont notamment la propreté, la facilité de transport et d'utilisation, son bon rendement et son adaptabilité à divers usages. On s'attend que la consommation d'électricité continuera de croître à un taux supérieur à celui de la population et de la consommation totale d'énergie.
- Cette demande croissante pèsera de plus en plus sur les ressources de base utilisées pour produire de l'électricité. On prévoit que les ressources naturelles de la planète s'épuiseront rapidement si elles continuent de servir pour l'essentiel à la production d'électricité et l'environnement en supportera les conséquences dans une large mesure. A long terme, il faudra étudier et exploiter d'autres ressources.
- Abstraction faite de la controverse quelque peu irrationnelle et toujours actuelle qu'elle a suscitée, l'énergie nucléaire est une source sûre, fiable, et économique d'électricité. En réalité, si l'on prend un certain recul, la demande croissante d'électricité dans le monde et le développement des parcs nucléaires, qui ne rejettent pas d'anhydride carbonique dans l'atmosphère, semblent coïncider par la force des choses.
- Le développement nucléo-énergétique continu sous forme de petites améliorations successives apportées aux installations en service et de progrès technologiques plus spectaculaires comme ceux qu'annoncent les réacteurs de pointe à l'étude apporte la réponse à nombre de questions que soulève l'énergie d'origine nucléaire; il faut donc poursuivre activement les programmes en cours.

