

DIXIEME ANNIVERSAIRE DE L'ENERGIE NUCLEOELECTRIQUE

Il y a dix ans, la première centrale nucléaire commençait de fournir de l'électricité en Russie; cet événement survenait lui-même douze ans après la première réaction en chaîne contrôlée, à Chicago.

Ce sont là les deux principales étapes du développement de l'énergie atomique entre le stade des idées abstraites et celui des applications industrielles courantes. Elles ont fait suite à une période de recherche pure et de travaux de laboratoire dont le point culminant a été la démonstration, par Enrico Fermi, d'un système permettant de contrôler les forces de l'atome. Il fallait alors trouver les moyens d'utiliser la réaction en chaîne à des fins pratiques et à l'échelle industrielle. Cela s'est révélé techniquement possible en 1954, mais il restait à rendre le processus économique.

Tout cela impliquait la solution d'innombrables problèmes théoriques et techniques, depuis les problèmes essentiels de la physique, des études et de la construction des réacteurs jusqu'aux problèmes secondaires de l'équipement auxiliaire. Non seulement il fallait utiliser à l'échelle industrielle toute une série de nouvelles matières qui n'avaient été manipulées jusque là qu'en laboratoire, mais la production d'une forte radioactivité donnait aussi une nouvelle dimension aux opérations industrielles. Même les métaux utilisés couramment dans l'industrie pouvaient se comporter étrangement après une exposition prolongée à un rayonnement intense dans les conditions normales de fonctionnement d'une centrale nucléaire. Les rayonnements posaient par ailleurs des problèmes de protection et de mise au point de moyens permettant d'effectuer, sur une grande échelle et dans des conditions économiques satisfaisantes, des opérations chimiques et métallurgiques complexes, tout en assurant la sécurité totale du personnel.

Il est difficile de trouver un précédent à l'effort déployé au cours de la dernière décennie par les nations qui ont été à l'avant-garde du développement de l'énergie nucléoélectrique. Cela est dû au fait que l'énergie atomique n'est pas une branche particulière de la science ou de la technologie utilisant ses propres spécialistes. Au contraire, l'atome sert un grand nombre de techniques requérant des spécialistes de nombreuses disciplines. Il peut permettre de faire les recherches biologiques les plus délicates, assurer le fonctionnement d'une grande centrale ou déplacer des millions de tonnes de terre. C'est ainsi qu'une centrale nucléaire est le résultat des efforts combinés de physiciens, de chimistes, de métallurgistes, d'ingénieurs et de nombreux autres spécialistes.

La centrale nucléaire a fait ses preuves tant du point de vue technique que du point de vue industriel. La troisième phase du développement était de la rendre concurrentielle avec les autres sources d'énergie; il semble que nous soyons sur le point d'atteindre cet objectif, plus lentement toutefois qu'on ne le prévoyait il y a dix ans.

Le monde se révèle un gros consommateur d'énergie - notamment d'énergie électrique - et, dans les pays avancés, le taux d'investissement dans les nouvelles sources énergétiques tend à être plus élevé que celui des nouveaux investissements en général. L'éventualité d'une pénurie de combustibles fossiles à des prix raisonnables a été de tout temps une source d'inquiétude. Pour faire face à l'accroissement des besoins, on a sans cesse développé les ressources disponibles: nouvelles découvertes, comme celle des champs pétrolifères du Proche-Orient et d'Afrique du Nord; nouvelles méthodes d'exploitation, comme l'extraction mécanisée du charbon et celle du pétrole par forage dans la mer; nouvelles méthodes d'utilisation. Mais nous dépendons de ressources limitées et comme les meilleures d'entre elles sont épuisées, les coûts ont tendance à monter.

Ce fut à une époque où dominait cette crainte d'une pénurie que l'énergie nucléoélectrique commerciale a reçu sa première grande impulsion. Il était inévitable que l'on se mette à penser à cette nouvelle forme d'énergie, mise au point pour la guerre, comme moyen de compenser l'insuffisance des ressources énergétiques. Lorsque l'énergie nucléaire devint une réalité, on se livra à des spéculations faciles sur ce moyen d'obtenir de l'énergie bon marché et en quantité pratiquement illimitée; entre les craintes suscitées par la pénurie d'énergie classique et les espoirs engendrés par l'abondance d'énergie nucléaire, ce sont ces derniers qui l'emportèrent, avec d'ailleurs un excès d'optimisme jusqu'à la fin de 1957 environ.

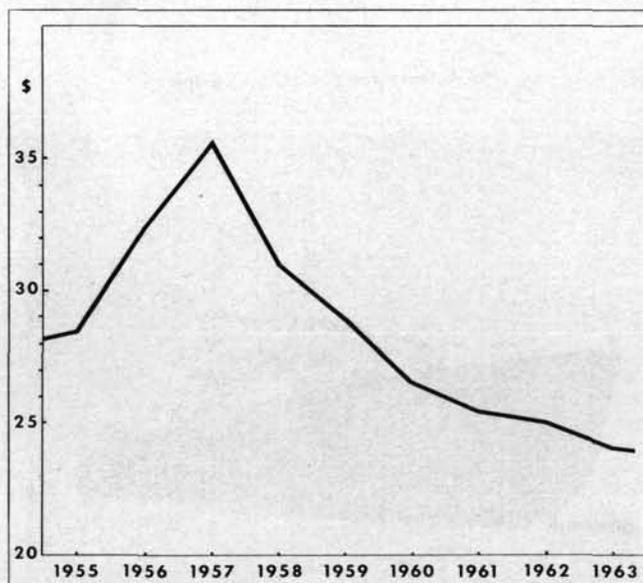
Les pays industriellement avancés s'embarquèrent dans de vastes programmes de recherches avec deux objectifs principaux en vue: faire face à leurs besoins énergétiques et développer une industrie nucléaire capable de ravitailler les marchés d'exportation et de satisfaire les besoins intérieurs. La Grande-Bretagne visait surtout le premier de ces objectifs, les Etats-Unis le second.

Vers 1950, plusieurs nations décidèrent d'accélérer carrément le développement de l'énergie nucléoélectrique. A cette époque, toute l'Europe occidentale - en particulier la Grande-Bretagne - souf-

frait d'une pénurie de charbon que l'on s'attendait à voir devenir de plus en plus grave. En 1955, la Grande-Bretagne annonça un programme de construction de centrales nucléaires qui permettrait de compenser cette insuffisance. En 10 ans, il allait être construit 12 centrales représentant une puissance totale de 1 500 à 2 000 MW. Elles étaient prévues en supplément de la construction de Calder Hall et d'autres centrales du même genre, conçues essentiellement pour produire du plutonium et fournissant de l'électricité comme sous-produit. Ces objectifs furent ensuite portés plus haut encore, de sorte que d'ici à 1969 les centrales nucléaires représenteront une puissance d'environ 5 000 MW, soit 12 % du total de la puissance installée en Grande-Bretagne.

Toutefois, en 1957-58, la situation subit un changement radical. De nouveaux gisements de pétrole furent découverts, les tarifs de transport maritime furent abaissés et la pénurie de combustible se transforma brusquement en excédent. Les mines de charbon avaient amélioré progressivement leurs méthodes d'exploitation et leur équipement, augmentant ainsi leur rendement. Dans plusieurs pays, comme l'Allemagne occidentale, on entreprit de rationaliser l'exploitation dès que la demande de charbon se fit moins pressante. Les puits non rentables furent fermés et l'on mit davantage de machines en place. Il en résulta une amélioration du rendement; en Allemagne occidentale par exemple, le taux moyen annuel d'accroissement de la production minière a été d'environ 7 % entre 1957 et 1961, ce qui est très supérieur au taux d'accroissement de l'industrie dans son ensemble.

Prix du pétrole brut (par baril) au Royaume-Uni.
(Bulletin mensuel de statistiques de l'ONU)



L'abondance relative de charbon et de pétrole ainsi que l'amélioration des méthodes d'exploitation entraînèrent naturellement, dans le monde entier, une baisse des prix des combustibles classiques. Une autre caractéristique de cette période est l'augmentation des taux d'intérêt. Le montant des investissements pour les centrales nucléaires étant notablement plus élevé que pour les centrales classiques, ces dernières sont favorisées par rapport aux premières lorsque le taux d'intérêt est élevé.

C'est ainsi qu'en deux ou trois ans les prévisions selon lesquelles l'énergie nucléoélectrique ferait concurrence à l'énergie classique vers 1965 dans d'importantes régions se révélèrent prématurées. L'urgence se fit moins sentir et le rythme des programmes nationaux d'énergie nucléoélectrique se ralentit. Les perspectives à long terme de la situation en matière de combustibles furent également quelque peu modifiées. En 1962, la Conférence mondiale de l'énergie fit, en collaboration avec les gouvernements, une étude générale des ressources énergétiques et une estimation des réserves de combustibles fossiles - houille, houille brune, lignite, tourbe, pétrole, huile de schistes et de sables bitumineux et gaz naturel - qui sont vraisemblablement exploitables dans des conditions économiques satisfaisantes. La masse totale de ces combustibles fut évaluée à environ 3 500 milliards de tonnes de houille, ce qui représente de 700 à 800 fois la consommation annuelle mondiale à l'heure actuelle. Il est vrai que la consommation s'accroît régulièrement; elle a augmenté de plus de 60 % au cours de la précédente décennie et rien ne laisse prévoir la fin de cette augmentation.

La conclusion de cette étude est qu'il n'y a pas de pénurie d'énergie pour l'ensemble du monde. Le problème est d'ordre économique. Les prix de revient varient considérablement selon les régions, en raison de la répartition inégale des ressources et des frais souvent élevés qu'entraînent le transport des matières premières et de l'énergie sous leurs différentes formes.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les progrès les plus récents dans le domaine de l'énergie nucléoélectrique. Dans certaines régions, cette énergie peut entrer en concurrence, marginalement tout au moins, avec l'énergie classique; les nations qui ont entrepris des programmes de développement intensif ont ainsi confirmation du bien-fondé de leurs vues.

Programmes nationaux

A l'origine, l'objectif des programmes nationaux de recherches était d'acquérir des connaissances et de l'expérience, de former du personnel à tous les niveaux et de jeter les fondements du génie atomique et des industries apparentées. L'expérience déjà acquise en matière de production d'armes nucléaires par les pays les plus avancés dans ce domai-

ne était précieuse, mais certains de ceux qui n'avaient pas passé par ce stade ont rapidement rattrapé leur retard.

Quand on construit une génératrice nucléaire, on a le choix entre de nombreuses possibilités, qu'il s'agisse du combustible, du fluide de refroidissement, du modérateur, de l'emploi des neutrons rapides ou des neutrons thermiques, etc. Mais au début, ce qui importait avant tout était évidemment la simplicité; des perfectionnements comme la "surgénération" ne devaient intervenir qu'à un stade ultérieur.

Le choix de la filière dépendait dans une certaine mesure des conditions nationales. Les Etats-Unis disposaient d'une grande usine de séparation des isotopes par diffusion, qui avait été construite à des fins militaires; cette usine permet de séparer l'uranium fissile, ^{235}U , de l'uranium naturel et elle fournit aux Etats-Unis du combustible "enrichi", c'est-à-dire un combustible qui contient une plus grande proportion de ^{235}U que l'uranium naturel. Ils ont ainsi été amenés à construire des réacteurs à eau bouillante et des réacteurs à eau sous pression, dont les caractéristiques sont très intéressantes.

La Grande-Bretagne et la France, qui ne disposent pas elles-mêmes de cette possibilité d'enrichissement du combustible, ont préféré concentrer leurs premiers efforts sur des réacteurs refroidis par un gaz et modérés au graphite, utilisant l'uranium naturel comme combustible. Ces réacteurs nécessitent des investissements plus importants que les réacteurs à eau, mais consomment moins de combustible. L'URSS a également construit ou étudié plusieurs réacteurs à eau. Le Canada met au point des réacteurs à eau lourde et uranium naturel.

En outre, plusieurs pays étudient un grand nombre d'autres types de réacteurs et construisent des prototypes, dont certains sont des variantes ou des perfectionnements de types existants, alors que d'autres sont conçus d'après des principes entièrement différents, procédant d'une technologie d'avant-garde.

Les renseignements ci-après sur quelques programmes nationaux ne constituent nullement une liste complète et détaillée, mais ont plutôt pour but de donner quelques exemples des diverses orientations de l'activité dans le domaine des réacteurs.

URSS

L'URSS a achevé au début de 1954 la construction d'une centrale nucléaire qui est entrée en service en juin de la même année. Elle est équipée d'un réacteur à eau sous pression, modéré au graphite et alimenté à l'uranium enrichi à 5%. Sa puissance thermique est de 30 MW et sa puissance électrique de 5 MW.

Il s'agissait surtout de résoudre les problèmes scientifiques et technologiques que pose la construc-

tion d'une centrale industrielle de fonctionnement sûr. Le coût de l'électricité produite était beaucoup plus élevé que celui de l'électricité produite par de grandes centrales thermiques, mais on voulait acquérir une expérience dans les domaines technique et économique et former du personnel. Ces objectifs ont été atteints, car la centrale s'est révélée à la fois sûre et efficace et elle a préparé le terrain pour la construction de réacteurs plus puissants et d'un meilleur rendement.

C'est ainsi qu'un réacteur de 100 MWe fonctionne aujourd'hui en Sibérie et que deux grandes centrales, de 210 MWe et 100 MWe respectivement, la seconde à surchauffe nucléaire, viennent d'être terminées.

Le brise-glace "Lénine", qui a été lancé en décembre 1957, est unique en son genre. Ce navire peut naviguer pendant un temps presque illimité, sans rechargement du combustible nucléaire, dans toutes les régions de l'Arctique. Il a un déplacement de 16 000 tonnes et une vitesse maximum de 18 noeuds en eau libre. Il fallait un réacteur compact, de grande puissance, pouvant fonctionner régulièrement dans des conditions difficiles: secousses, vibrations et chocs. On l'a équipé de trois réacteurs à eau sous pression et à l'uranium enrichi; la hauteur du coeur n'est que de 1,6 m environ et le diamètre de 1 mètre. Il eût été plus économique de n'avoir qu'un réacteur, mais trois (dont un de réserve) donnent plus de sécurité. Les turbines ont une puissance de 44 000 CV.

Le "Lénine" a effectué plusieurs campagnes avec succès. Pendant les trois premières années, il a parcouru 50 000 milles, la plupart du temps dans des conditions difficiles, au milieu de la banquise. Ses réacteurs ont fonctionné pendant trois ans sans rechargement du combustible.

Le brise-glace nucléaire « Lénine ».

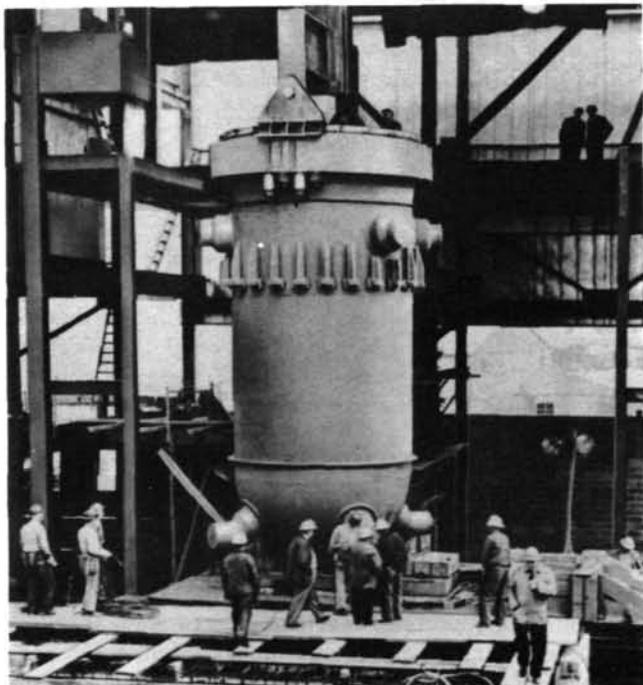


ETATS—UNIS

Aux Etats-Unis, les premières recherches sur les réacteurs ont été consacrées à des questions telles que la production de plutonium et la propulsion des navires. Le premier prototype de réacteur à l'eau ordinaire sous pression et à uranium enrichi est entré en exploitation en 1953. Ces recherches ont constitué une première étape grâce à laquelle on a pu entreprendre cette même année un programme expérimental de cinq ans en vue du développement de l'énergie nucléoélectrique à des fins non militaires. Bien que les Etats-Unis soient amplement pourvus dans la plus grande partie de leur territoire en ressources classiques de combustibles, ils exécutent le programme de recherches le plus important et le plus diversifié du monde.

En plus de la construction de plusieurs génératrices nucléaires expérimentales, on entreprit à Shippingport la construction d'un prototype qui devait être relié au réseau d'électricité. Deux ans plus tard, on lança un programme de démonstration dans le cadre duquel la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis et l'industrie privée ont construit et exploité en coopération un certain nombre de centrales nucléaires pour alimenter le réseau de distribution. Ou bien la Commission a construit et exploité les réacteurs et a vendu la vapeur aux compagnies d'électricité; ou bien elle a aidé les compagnies à étudier et à construire leurs propres réacteurs et n'a demandé aucune redevance, pendant les premières années, pour le combustible fourni en location par le Gouvernement. En 1958, la Commission a publié des éva-

Mise en place de la cuve de 235 tonnes du réacteur de Shippingport, Etats-Unis d'Amérique (photo USAEC).



luations détaillées des différentes filières de réacteurs.

Depuis cette époque, la recherche et la mise au point ont été poursuivies dans de vastes domaines et on a procédé à l'essai de types très divers dans des réacteurs expérimentaux ou de démonstration : réacteurs modérés à l'eau lourde ou par un fluide organique, réacteurs au graphite et au sodium, réacteurs refroidis à haute température par un gaz et réacteurs à neutrons rapides.

Cependant, la plupart des résultats pratiques obtenus jusqu'à présent l'ont été avec des réacteurs à eau sous pression et à eau bouillante utilisant de l'eau ordinaire comme fluide de refroidissement et comme modérateur et de l'uranium enrichi comme combustible. Trois centrales sont déjà en service depuis longtemps : Shippingport, Dresden et Yankee. Trois autres centrales importantes sont entrées en service plus récemment : Consolidated Edison ou Indian Point, Big Rock Point et Humboldt Bay.

La centrale de Shippingport a un réacteur à eau sous pression de 60 MWe; la construction a commencé en 1955 et la pleine puissance a été atteinte à la fin de 1957. Ce réacteur n'était pas destiné à la production d'électricité; il devait constituer un laboratoire à l'échelle industrielle pour l'étude des problèmes de construction et d'exploitation d'une grande centrale. En perfectionnant la technologie des réacteurs refroidis à l'eau ordinaire, le laboratoire de Shippingport pouvait montrer comment réduire les prix de revient tout en obtenant de meilleurs rendements que par la simple optimisation de techniques existantes. Six années d'expérience ont montré que les centrales nucléaires équipées de réacteurs à eau sous pression pouvaient satisfaire aux critères essentiels : possibilité d'intégration dans un grand réseau de distribution, faibles temps morts pour le rechargement en combustible et l'entretien, sécurité radiologique satisfaisante. La réponse de la centrale aux variations du facteur de charge a été supérieure à celle des centrales classiques alimentant le même réseau; les procédures courantes de contrôle des rayonnements ont été "plus que suffisantes" pour assurer une protection efficace contre les rayonnements.

La centrale Yankee, équipée d'un réacteur à eau sous pression ayant actuellement une puissance de 175 MWe, est entrée en service en novembre 1960 et a donné des résultats meilleurs qu'on ne l'espérait. Elle devait servir d'installation de démonstration, avant que l'on puisse envisager la production d'électricité à des prix concurrentiels. Cependant, le prix de revient moyen de l'électricité produite avec le premier cœur a été inférieur à 9,5 mills par kWh. Les centrales classiques d'une puissance sensiblement égale construites à la même

époque en Nouvelle-Angleterre (où se trouve la centrale Yankee) produisent de l'électricité à un prix de revient d'environ 8 mills. La compagnie exploitante a fait savoir que "le prix de revient de l'électricité produite par la centrale Yankee est, dès le début, plus proche que nous ne l'avions espéré du niveau concurrentiel".

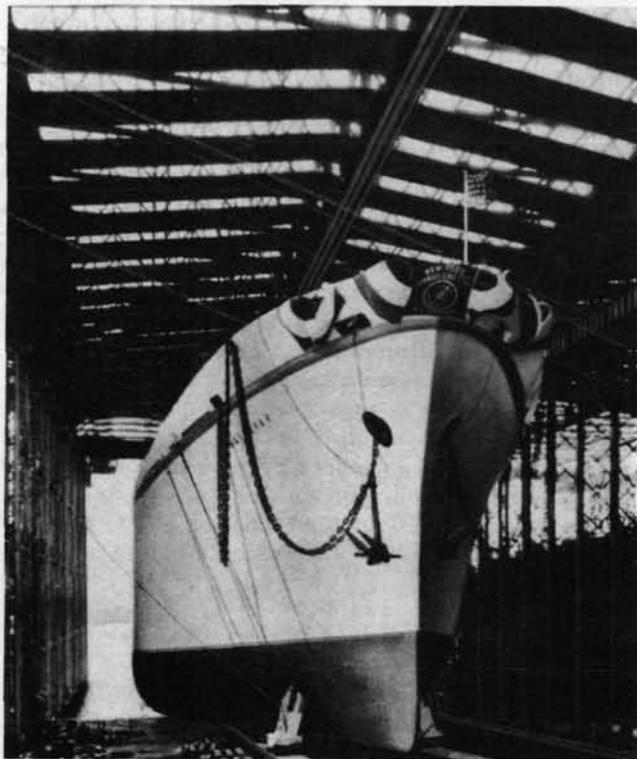
Le réacteur d'Indian Point, d'une puissance de 275 MWe, utilise comme combustible de l'uranium pleinement enrichi en combinaison avec du thorium utilisé comme matière fertile. Pendant le processus de fission, le thorium est transformé en uranium fissile; il y a donc génération de combustible. Le réacteur produit de la vapeur saturée, qui est ensuite surchauffée au mazout. La construction de cette centrale a été financée par la compagnie, sans aucune subvention; la meilleure preuve de son succès est que la compagnie a décidé peu après de construire une deuxième centrale nucléaire du même type, mais d'une puissance de 1 000 MW.

La centrale de Dresden a été conçue sur la même base commerciale; elle a été construite par une entreprise industrielle pour un prix forfaitaire; on a indiqué qu'elle donnait d'excellents résultats de façon constante dans les conditions normales des réseaux, où la fiabilité est un facteur essentiel. A cet égard, on déclare qu'elle est comparable à la meilleure centrale thermique au charbon du réseau de distribution Commonwealth-Edison.

Les dépenses d'investissement des centrales Dresden et Yankee ont été évaluées respectivement à 250 dollars et 224 dollars par kW de puissance électrique nette installée et le coût initial du combustible a été évalué à 4 mills par kWh. Cependant des entreprises de construction ont fait depuis des propositions portant sur des installations de 400 MW et plus, à des prix garantis de l'ordre de 132 à 210 dollars pour la construction et de 1,8 à 2,25 mills pour le combustible. La diminution des dépenses d'investissement est due en grande partie à l'accroissement des dimensions de la centrale et celle du coût du combustible à des méthodes de fabrication améliorées et à une plus longue irradiation de l'uranium.

Presque tous les réacteurs à l'eau ont dépassé les puissances nominales prévues: le réacteur de Dresden a été porté de 629 à 700 MWt; le réacteur de Yankee a été porté de 392 à 485 MWt, puis à 540 MWt avec le deuxième coeur. Bien que cette amélioration des prévisions - qui s'est également produite avec d'autres filières dans d'autres pays - soit encourageante, on a fait remarquer qu'elle était également l'indice de connaissances insuffisantes de la part des bureaux d'études. L'un des objectifs des centrales de démonstration est de donner aux spécialistes une expérience qui suppléera à ces insuffisances.

D'autres réacteurs des Etats-Unis ont été construits pour répondre à des besoins militaires et à d'autres besoins spéciaux; bien qu'ils ne soient pas "économiques" au sens habituel de ce terme, ils ont fourni une preuve éclatante des nombreuses possibilités d'utilisation et de la fiabilité des centrales nucléaires. A la fin de 1961, un réacteur à eau sous pression a été expédié à McMurdo Sound, dans l'Antarctique, et a fourni 1 500 kWe pour toutes les activités scientifiques des Etats-Unis dans cette région; on a ainsi résolu un important problème de transport de combustibles.



Lancement du «Savannah», juillet 1959 (photo US Maritime Administration).

La propulsion nucléaire des navires de guerre, notamment des sous-marins, est un très grand succès sur le plan technique. Le premier sous-marin nucléaire, le Nautilus, a été lancé en janvier 1955; en deux périodes de 26 mois, il a parcouru une distance de 69 138 milles avec le premier coeur du réacteur et de 93 000 milles avec le deuxième coeur. Le sous-marin Sargo a traversé l'Arctique sous la calotte glaciaire.

Les réacteurs marins - petits, compacts et dotés de nombreux dispositifs spéciaux - sont beaucoup trop onéreux pour pouvoir être utilisés sur des navires marchands, mais leur succès a encouragé la recherche et le développement dans le domaine de la propulsion des navires marchands. Le Savannah est un navire marchand de 22 000 tonnes, équipé d'un réacteur à eau sous pression d'une puissance de

69 MWt, qui fournit une puissance à l'arbre de 22 314 CV, soit une vitesse maximum de 24 noeuds. Les essais ont montré que le navire pouvait effectuer de longues courses à vitesse élevée. Comme le réacteur de Shippingport, le réacteur du Savannah n'a pas été conçu en vue d'une production économique, mais comme prototype expérimental, doté de nombreux appareils spéciaux à des fins de recherche.

ROYAUME—UNI

Le programme britannique d'énergie nucléaire électrique a été mis en oeuvre dans trois directions parallèles :

Construction de réacteurs destinés à la production de plutonium, l'électricité étant considérée comme un sous-produit ;

Construction d'une série de centrales nucléaires exclusivement destinées à la production d'électricité à des fins commerciales et équipées de réacteurs de la même filière que les réacteurs plutonigènes ;

Recherche et mise au point de modèles plus perfectionnés, en vue de la construction et de l'exploitation de prototypes.

Calder Hall, la première des centrales plutonigènes, emploie l'uranium naturel comme combustible, sous forme de métal revêtu d'un alliage à base de magnésium (Mgnox), avec du graphite comme

Élément combustible Mgnox dans un manchon de graphite (photo UKAEA).



modérateur et du gaz carbonique comme fluide de refroidissement. Le premier réacteur a atteint l'état critique en 1956 et la centrale a été aussitôt connectée au réseau national. Le premier réacteur de la station jumelle, Chapel Cross, a atteint l'état critique en 1958. En 1960, les huit réacteurs fonctionnaient à pleine puissance.

Bien que la production d'électricité soit secondaire, la performance des centrales dans ce domaine s'est révélée, sur le plan technique, plutôt meilleure qu'on ne l'espérait. On avait prévu une puissance des réacteurs de 180 MWt, mais grâce à l'amélioration des techniques d'exploitation ce chiffre a pu être considérablement dépassé, de sorte que la puissance des réacteurs a été portée à 230 et même à 250 MWt. Le temps consacré à l'entretien et au rechargement a été considérablement réduit, ce qui a permis d'arriver à des facteurs de charge de 94 %. Les températures et les pressions dans les réacteurs ont été augmentées et les turbines munies de nouvelles pales pour faire passer leur puissance nominale de 21 à 27-30 MWe, de sorte que la production nette d'électricité a été portée de 34,5 à 45 MWe.

L'expérience acquise dans les débuts à Calder Hall a permis d'apporter un grand nombre d'améliorations aux réacteurs du même type. L'une des principales modifications a constitué d'augmenter de 50 % l'épaisseur des tôles d'acier qu'il était possible de souder de façon satisfaisante pour former le caisson étanche du réacteur. On a pu ainsi réaliser des coeurs d'un diamètre plus grand, avec une répartition plus uniforme de la chaleur dans le coeur et des pressions plus élevées du gaz. D'autres améliorations sont intervenues à la suite de l'étude des surfaces de transfert thermique et de la modification des surfaces des éléments combustibles. On a mis au point des méthodes satisfaisantes de rechargement en marche, sans diminution de la puissance.

En 1955, on a annoncé un programme de construction de centrales nucléaires exclusivement destinées à la production d'électricité. Ce programme prévoyait la mise en service avant 1965 de 12 centrales, d'une puissance globale de 1 500 à 2 000 MW. En 1957, on a décidé de porter cette puissance à 5 ou 6 000 MW, ce qui devrait permettre de satisfaire le quart environ des besoins de l'ensemble du pays.

Néanmoins, si la performance technique des premières centrales a pleinement répondu aux espérances que l'on nourrissait, il n'en a pas été de même des prévisions de dépenses initiales. On prévoyait que les dépenses d'investissement ne dépasseraient pas 120 livres sterling par kW installé, plus 30 livres sterling environ pour le stock de combustible (contre 55 livres sterling environ par kW pour une centrale thermique comparable en Grande-Bretagne), et que les premières centrales nuclé-

aires produiraient de l'électricité dont le kWh reviendrait approximativement à 0,6 penny.

Tout cela était fort problématique et incertain à une époque où aucune centrale nucléaire ne fonctionnait encore et où il restait encore à mettre au point un grand nombre de détails au stade des études. Il n'est donc pas surprenant que lorsque la pénurie de combustible devint moins critique, le programme ait été quelque peu ralenti et étalé sur une période plus longue. L'expérience révélait aussi l'avantage qu'il y avait à construire un plus petit nombre de centrales plus importantes.

Le programme modifié se présente alors ainsi :

Centrale	Année de mise en service du premier réacteur	Puissance nette en MWe
Berkeley	1962	275
Bradwell	1962	300
Hinkley Point	1963	500
Trawsfynydd	1964	500
Dungeness	1964	550
Hunterston	1964	300
Sizewell	1965	580
Oldbury	1966	560
Wylfa	1968	1 180

Toutes ces centrales utilisent du combustible sous gaine en "Magnox" : les matières sont relativement bon marché et faciles à se procurer, aucun enrichissement n'est nécessaire et les éléments combustibles sont relativement peu coûteux à fabriquer ; en contrepartie, le Magnox impose une température de fonctionnement assez basse, environ 420°C, ce qui limite l'efficacité ainsi que le potentiel de développement de ce type de centrale.

Lors des études des premières centrales, l'idée fondamentale était de concevoir le réacteur et son fonctionnement de la façon la plus simple possible ; on omettait souvent certains raffinements, dans l'intérêt de la simplicité mécanique. Chacune des centrales précitées a deux réacteurs.

Bien que Berkeley et Bradwell, construites exclusivement pour produire de l'électricité, représentent un progrès sur Calder Hall, les soumissions pour leur construction furent reçues en 1955 et les contrats conclus l'année suivante - de sorte que l'on commença à les construire sans pouvoir tenir compte de l'expérience acquise par l'exploitation de Calder Hall. Une grande partie des plans et de la fabrication fut effectuée avant que l'on connaisse tous les résultats des recherches et des mises au point nécessaires, ce qui entraîna de nombreuses modifications et certaines

difficultés. A Berkeley, il s'ensuivit un retard de 14 mois et les modifications représentèrent une dépense totale de 5,1 millions de livres sterling. Les dépenses d'investissement passèrent de 145 à 173 livres sterling par kilowatt.

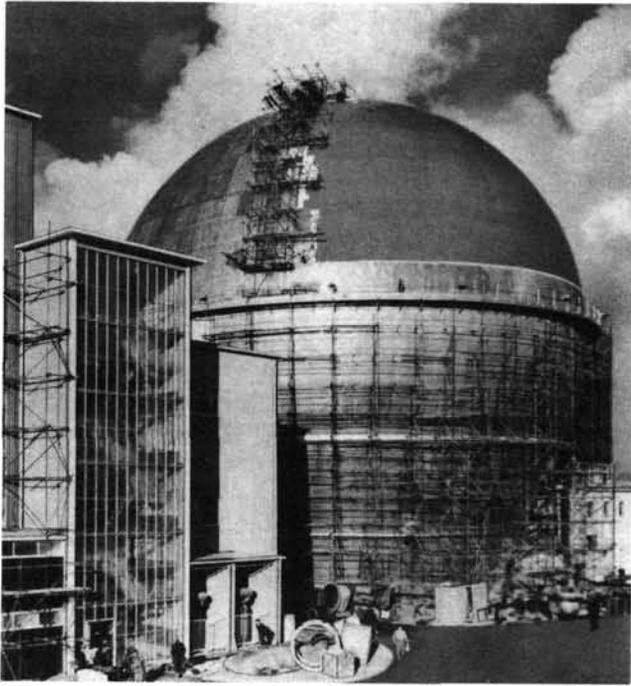


Un échangeur de chaleur destiné à la Centrale nucléaire de Bradwell, Grande-Bretagne (photo UKAEA).

A Bradwell, le prix de revient de l'électricité a été estimé à 1,12 penny par kWh : 0,80 penny pour les charges financières et 0,32 penny pour les frais d'exploitation. Ces chiffres sont nécessairement sujets à caution, puisqu'ils reposent sur certaines hypothèses qu'il faudra vérifier dans la pratique : vie utile de vingt ans pour le réacteur et irradiation de 3 000 MWj/t.

Dans l'ensemble, toutefois, ces hypothèses se révéleront sans doute très prudentes. Le fonctionnement de ces centrales est souple et sûr, et l'on envisage de leur apporter de nouvelles améliorations rendues possibles en grande partie par l'augmentation des dimensions des centrales. A Hinkley Point, où la pression du fluide de refroidissement et la puissance nette par tonne de combustible sont plus élevées, on espère que le prix de revient de l'électricité sera de 1,02 penny par kWh.

Pendant que ce programme de centrales du type "Magnox" était en cours, la Grande-Bretagne a entrepris de perfectionner la filière des réacteurs refroidis par un gaz, en utilisant des éléments combustibles céramiques à uranium légèrement enrichi. Un prototype construit à Windscale a atteint sa puissance nominale en 1963.



Le réacteur refroidi au gaz de Windscale, Grande-Bretagne, d'une conception très moderne, en voie d'achèvement (1961) (photo UKAEA).

Une autre voie suivie dès les débuts a abouti à la construction, à Dounreay, d'un réacteur surgénérateur à neutrons rapides qui est entré en divergence pour la première fois en 1959 et est utilisé maintenant pour l'essai d'éléments combustibles.

FRANCE

La France a suivi une voie très semblable à celle qu'a empruntée la Grande-Bretagne, mais elle a avancé plus lentement, en cherchant surtout à acquérir de l'expérience plutôt qu'à produire de l'électricité. Le choix de réacteurs à l'uranium naturel et au graphite a également été influencé dans une certaine mesure par la facilité qu'elle avait de se procurer ces matières, puisque la France possède des gisements de minerais d'uranium et une importante industrie du graphite.

Le programme français consiste à construire une série de centrales nucléaires, la phase expérimentale incombant au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et la phase des réalisations industrielles à l'Electricité de France (EDF). Il prévoit la construction d'une centrale nucléaire tous les 18 mois, chacune d'elles étant plus puissante et ayant un meilleur rendement que la précédente.

Le but essentiel de ce programme étant d'accumuler de l'expérience, chaque réacteur doit être différent des précédents; c'est ainsi que la centrale G2 a des caissons en béton et des canaux de combustible horizontaux, tandis que la première des centra-

les de l'EDF a un caisson étanche en acier et des canaux verticaux. A la lumière de l'expérience et des progrès techniques, chacun des réacteurs mis successivement en place était d'un type nouveau et perfectionné. Cette façon de procéder permet de recueillir à long terme les bénéfices d'une vaste expérience, mais elle comporte aussi certains inconvénients évidents. La mise au point de chaque réacteur occasionne de grands frais et les possibilités de normalisation sont limitées.

Dans ces premières centrales, on n'a pas cherché à obtenir une très grande régularité de fonctionnement. On a estimé, au contraire, que l'on parviendrait à mieux connaître les matériaux et les éléments du réacteur en le faisant fonctionner aux conditions limites admissibles. Les spécifications sont néanmoins très strictes. Aucun élément essentiel du réacteur n'est mis en service avant que le prototype n'ait effectué sans la moindre défaillance des essais équivalant à un minimum de 2 000 années de service. Après quatre ans environ de fonctionnement, les réacteurs G2 et G3 ont démontré leur sûreté.

Le programme de construction est le suivant :

Centrale	Puissance		Mise en service
	MWt	MWe	
G2	250	37	1959
G3	250	37	1960
EDF-1	300	68	1963
EDF-2	800	198	1964
EDF-3	1 560	480	1966
EDF-4			1968
*EDF-5		500	1971

* Prévisions.

Bien que le système uranium naturel/graphite soit le même que celui qui est utilisé en Grande-Bretagne, la technologie des réacteurs français diffère sur plusieurs points importants. Par exemple, l'utilisation de béton précontraint pour le caisson et les protections supprime la nécessité de caissons étanches en tôles d'acier soudées et permet d'avoir un réacteur beaucoup plus compact, avec un plus grand coeur et une pression de gaz plus élevée. Une autre différence réside dans la construction des échangeurs thermiques. La Grande-Bretagne préfère un petit nombre de très grands échangeurs qui sont assemblés et montés sur place. En France, où la tendance est de passer des contrats avec plusieurs sociétés spécialisées, il est plus avantageux de fabriquer de petits échangeurs thermiques en usine; cette solution permet de réaliser certaines économies.

On a progressivement augmenté le rendement des centrales nucléaires en améliorant les plans et en

tenant compte de l'expérience acquise en cours de fonctionnement. Dans les réacteurs G2 et G3, la puissance spécifique maximum du combustible était de 3,5 MW par tonne d'uranium; dans le réacteur EDF-3, ce chiffre a été porté à 6,2 MW.

Dans G2, la puissance du canal le plus chargé était de 260 kW; dans EDF-3, elle est de 660 kW. Ces perfectionnements résultent d'un certain nombre de modifications apportées aux caractéristiques et à la composition des éléments combustibles.

La pratique consistant à changer le combustible en marche a été une réussite, car elle permet non seulement d'augmenter le temps d'utilisation du réacteur, mais aussi d'optimiser le programme de renouvellement du combustible. L'utilisation dans plusieurs réacteurs de pièces ayant les mêmes caractéristiques pour certaines parties constitutives de ces réacteurs a permis de réduire un peu leur prix de revient, et l'expérience acquise dans la fabrication des éléments combustibles a entraîné une diminution du nombre des mises au rebut.

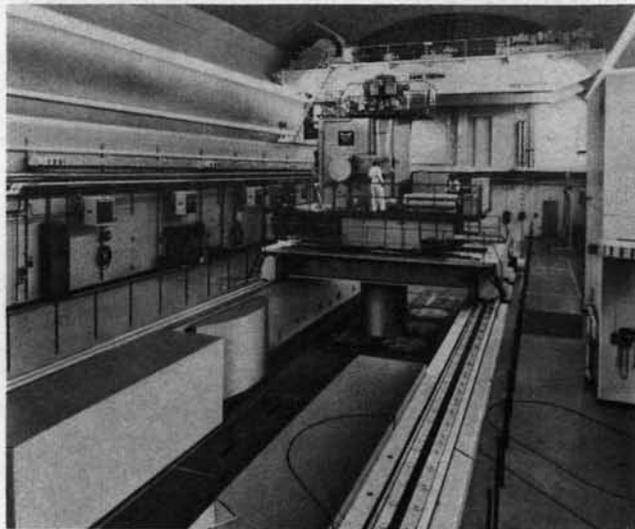
En plus de cette série de réacteurs, EDF collabore avec un groupe belge à la construction, à Chooz, d'un réacteur à eau sous pression de 242 MW et, de son côté, le CEA a construit un prototype de réacteur ralenti à l'eau lourde et refroidi par un gaz, d'une puissance de 80 MWe et met au point plusieurs types de réacteurs.

CANADA ET SUEDE

Au Canada où l'énergie classique est, en règle générale, peu coûteuse et où l'approvisionnement ne pose pas de problèmes, on a établi un programme conçu de manière qu'à long terme les constructeurs canadiens puissent étudier et construire des centrales nucléaires pour les besoins du pays et pour l'exportation. Ce programme est fondé sur une seule filière, celle des réacteurs à eau lourde.

Le petit réacteur NRX, achevé en 1947, fut suivi, en 1957, d'un réacteur NRU, puis vint le NPD, réacteur de 20 MWe à uranium naturel et à eau lourde, qui a atteint la pleine puissance en 1962. Le dernier de la série est le réacteur de grande puissance CANDU de 200 MWe, qui en est aux tout derniers stades de la construction et des essais.

La Suède a tout d'abord envisagé avec un vif intérêt la possibilité de produire de l'énergie d'origine nucléaire pour le chauffage urbain. Par la suite, on s'est rendu compte que les dimensions de la centrale et le facteur de charge ont de telles incidences sur le prix unitaire qu'il serait difficile de rendre cette production rentable, car la charge maximum n'intervient qu'en hiver pendant une courte période. C'est pourquoi deux projets de centrales ont été combinés en un seul en 1958, celui d'Ågesta. Il s'agit d'un réacteur à eau sous pression, à uranium naturel et à



La Centrale nucléaire d'Ågesta, Suède.

eau lourde, dont la puissance sera de 65 MW, 10 MW pour la production d'électricité et 55 MW pour la production de chaleur (chauffage urbain). Il a été mis en service en 1964. La construction d'une autre centrale nucléaire à eau bouillante de 200 MWe pour faire face à la charge de base vient de commencer. Sa mise en service est prévue pour 1968.

ITALIE ET JAPON

L'Italie, à la différence de la plupart des pays dont il a été question jusqu'à présent, se préoccupe d'abord de résoudre le problème assez urgent de l'approvisionnement en énergie; sa politique consiste donc à faire construire des centrales nucléaires par des entreprises étrangères. En 1958, elle a passé un contrat pour l'implantation, à Latina, d'une centrale Magnox de construction britannique, semblable à la centrale de Bradwell et ayant une capacité de 200 MWe. L'année suivante, elle a passé un deuxième contrat, avec une firme américaine cette fois, pour la construction, à Garigliano, d'une centrale à eau bouillante de 150 MWe qui a à peu près les mêmes caractéristiques que celle de Dresden. La centrale de Latina a commencé à alimenter le réseau en mai 1963, quelques mois avant celle de Garigliano. Une troisième centrale construite à Trino est presque achevée. Elle est équipée d'un réacteur américain à eau sous pression, semblable à celui de la centrale Yankee; elle a une puissance électrique brute de 270 MW.

L'exécution de ces contrats a donné aux industries locales l'occasion d'acquérir une expérience très utile en participant à la construction de réacteurs de trois types différents. Les importations nécessaires pour ces trois centrales représentent de 33 à 50 % de l'ensemble des investissements. Il a fallu faire appel à l'étranger lorsqu'il s'agissait

d'appliquer des techniques spécialisées et de se procurer des pièces dont la fabrication en Italie aurait été trop onéreuse.

Le Japon a suivi une politique très semblable à celle de l'Italie pour la même raison : la pénurie de combustibles fossiles dans le pays, qui oblige à en importer des quantités de plus en plus grandes. Les besoins en énergie et la taille des centrales nouvellement installées continuent d'augmenter régulièrement ; la situation est donc favorable pour l'énergie d'origine nucléaire. Toutefois, le Japon a des problèmes de sécurité particuliers à résoudre, parce qu'il appartient à une zone de forte sismicité et que sa population est très dense. Ces problèmes ont été résolus par l'adoption d'un type particulier de centrale et le soin qu'on a apporté à choisir l'emplacement des usines. Les mêmes problèmes se posent en Italie.

Le Japon a passé un contrat pour l'implantation, à Tokai Mura, d'une centrale nucléaire de construction britannique, avec la participation de l'industrie locale. Elle aura une puissance de 158 MWe. Son achèvement est prévu pour 1965.

Le Japon s'intéresse également à la mise au point des réacteurs à eau bouillante.

BILAN D'UNE DECENNIE

La première décennie de l'énergie d'origine nucléaire laisse entrevoir de nombreuses possibilités dans le choix des filières de réacteurs ; à l'issue de cette période, deux types principaux sont déjà éprouvés, les réacteurs à eau et les réacteurs ralentis au graphite et refroidis par un gaz, et de nombreuses autres possibilités intéressantes sont à l'étude. Chaque filière présente également de nombreuses variantes possibles et les divers programmes nationaux ont montré les avantages respectifs de certaines de ces possibilités, comme par exemple les caissons en béton précontraint et les caissons en acier.

Le choix d'une filière pour une centrale nucléaire civile est régi aussi bien par des considérations d'ordre économique que par des facteurs techniques. Les réacteurs à eau utilisent du combustible enrichi ; ils sont plus petits et exigent des investissements moindres que les réacteurs graphite-gaz, mais par contre le coût du combustible est plus élevé. Du point de vue du fonctionnement, les réacteurs des deux filières ont déjà fait leurs preuves. L'expérience a montré qu'ils étaient très sûrs - peut-être plus sûrs encore que les centrales classiques - et ils offrent un haut degré de sécurité et une grande souplesse de fonctionnement. Ils peuvent s'adapter aisément à une chute totale de la charge comme à une reprise de la charge à un taux voulu. Ils peuvent s'intégrer dans un vaste réseau comportant des usines produisant de

l'électricité d'origine différente. La formation des opérateurs ne pose pas de problèmes trop ardues et, à mesure que les équipes acquièrent de l'expérience, elles obtiennent progressivement de meilleurs résultats, notamment dans le rechargement.

Chaque centrale nucléaire a apporté des enseignements qui ont déjà eu pour résultat d'améliorer les caractéristiques et de perfectionner la technique de celles qui ont été construites ultérieurement. La composition et la forme des éléments combustibles ont fait l'objet d'études poussées, et le taux de combustion a dépassé les prévisions initiales. D'autres modifications dans les matériaux et les plans ont permis de travailler à des températures et à des pressions plus élevées et, partant, d'obtenir de meilleurs rendements.

L'influence de la dimension de la centrale sur sa rentabilité a déjà été amplement prouvée. Au début, on avait espéré que les petites centrales de 30 à 50 MW seraient rentables, cet espoir a dû être abandonné avec regret, au moins momentanément, et ce sont les pays les plus développés qui ont tiré le plus grand profit de l'énergie d'origine nucléaire. Même dans ces pays, on considère que des réacteurs beaucoup plus puissants que les machines actuellement en service - réacteurs de 500 MW ou plus - seraient plus économiques, et il n'y a pas beaucoup de réseaux auxquels on puisse intégrer des réacteurs aussi puissants. Toutefois, l'accroissement de la demande, et l'avènement de nouvelles applications, comme par exemple la purification de l'eau, justifieront la construction d'installations de très grande puissance.

Le prix de revient a diminué progressivement. Au cours des quatre premières années de l'exécution du programme britannique, le montant des investissements nécessaires pour la construction d'une centrale Magnox a pu être réduit d'un tiers. Les ressources en uranium se sont révélées beaucoup plus abondantes que prévu au début de la décennie, et son prix a baissé en conséquence.

Tout bien considéré, l'énergie d'origine nucléaire commence à peine à soutenir la concurrence de l'énergie produite par les moyens classiques. D'après les soumissions reçues récemment pour la construction de centrales nucléaires de grande puissance pour le compte de New Jersey Central (à Oyster Creek) et de Niagara Mohawk (Nine-Mile Point), on prétend qu'en l'occurrence l'énergie d'origine nucléaire non subventionnée est certainement moins coûteuse que l'énergie classique, sa rivale.

Il a été difficile de prévoir où et quand la parité serait atteinte. Au cours de la première moitié de la décennie, on a déployé de nobles efforts pour déterminer, à l'aide de savants calculs, et par extra-

polution d'un très petit nombre de données, le moment où le cap serait franchi, autrement dit, celui où l'énergie d'origine nucléaire deviendrait plus rentable que l'énergie d'origine classique.

Or, les renseignements qu'on a pu obtenir au cours des deux ou trois dernières années confirment la conviction première, à savoir que tôt ou tard l'énergie d'origine nucléaire couvrira ses frais, et pour l'instant on se contente de progrès échelonnés. D'ailleurs, on commence à disposer de données précises sur les prix de revient, notamment en ce qui concerne le coût des investissements et, depuis quelque temps, on a rassemblé beaucoup plus de renseignements sur les frais d'exploitation. Cependant, il reste encore beaucoup d'inconnues : durée de vie d'une centrale, prix du combustible nucléaire à long terme, valeur de rachat du combustible irradié, etc.

Des comparaisons internationales peuvent se révéler fallacieuses, car certaines bases du calcul du prix de revient, comme par exemple les charges financières, les impôts, etc., diffèrent sensiblement d'un pays à l'autre. En outre, un seul calcul est ré-

ellement valable : celui que l'on fait pour un cas donné en tenant compte de tous les aspects de la situation locale et des besoins du réseau.

De plus, lorsqu'il s'agit de choisir un type de centrale, le prix de revient de l'énergie n'est pas, à beaucoup près, le seul élément à prendre en considération. Même si une centrale nucléaire présente les meilleures perspectives à long terme, il se peut que l'on recule devant le montant élevé des investissements initiaux. Il se peut qu'un pays qui possède des réserves de combustibles fossiles et un potentiel hydroélectrique préfère les employer pour épargner des devises ou pour rester indépendant de sources d'approvisionnement en uranium situées à l'étranger.

Cependant, les travaux des dix dernières années ont clairement montré que la production d'énergie d'origine nucléaire était techniquement possible, et que les perspectives d'amélioration du prix de revient étaient encore illimitées ; aussi ne subsiste-t-il plus aucun doute quant à l'avenir de l'énergie de cette origine.