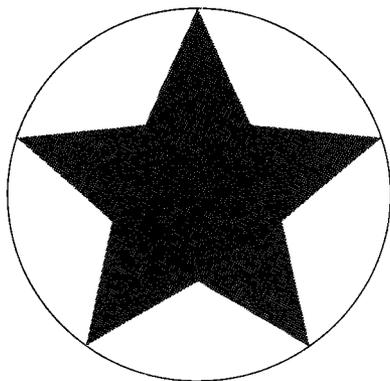


une centrale nucléaire a stimulé son développement. A l'heure actuelle il est aussi connu pour ses résultats scientifiques en matière de recherche fondamentale, ainsi que pour ses travaux d'ingénierie en matière de conception de réacteurs et ses études de projets de plusieurs centrales nucléaires.

Vingt ans après, il est agréable de se souvenir que la mise en service en Union soviétique de la première centrale nucléaire de notre planète a prouvé au monde entier qu'il était parfaitement possible d'appliquer l'énergie atomique non pas à la destruction des villes et des peuples, mais pour la prospérité et le bonheur de l'humanité.



## L'énergétique nucléaire et le progrès technique

par l'Académicien A.P.Alexandrov et le  
Professeur N.N. Ponomarev-Stepnoï

---

La première centrale nucléaire du monde construite en 1954 par l'Union soviétique a non seulement marqué le début d'une ère nouvelle dans la production d'énergie électrique, mais elle a aussi prouvé clairement que l'homme était capable d'exploiter les énormes ressources que représente l'énergie nucléaire.

La découverte du principe, permettant d'utiliser l'énergie libérée par les réactions en chaîne dues à la fission de noyaux lourds et à la fusion de noyaux légers, figure parmi les plus prodigieuses possibilités que la science nous ait jamais offertes.

Toute la valeur de cette découverte n'apparaîtra que plus tard, vers la fin de notre siècle, mais il est d'ores et déjà certain que l'énergie produite par fission ou fusion nucléaire sera largement appliquée car elle nous fournit, du point de vue technique et économique, le seul moyen rationnel de surmonter la pénurie de combustibles d'un emploi facile et à bon marché tels que le pétrole et le gaz.

L'expansion de l'énergétique nucléaire à des fins variées — production d'énergie électrique et de chaleur industrielle, chauffage urbain, approvisionnement en chaleur et en électricité de l'industrie métallurgique et préparation des agents réducteurs dont la métallurgie a besoin, approvisionnement en énergie électrique et thermique de diverses branches de l'industrie chimique et stimulation par irradiation de différentes opérations de cette industrie — permettra d'économiser le pétrole et le gaz qui pourront être affectés à des fins où il est plus difficile de les remplacer.

Le principal et le plus rationnel des domaines d'application du pétrole et du gaz sera naturellement la chimie organique avec son immense éventail de produits à base d'hydrocarbures, qui s'étend des matières plastiques et matériaux complexes aux graisses et protéines.

Certes, dans l'avenir immédiat, on ne pourra guère se passer du pétrole ni du gaz comme sources d'énergie et il serait particulièrement difficile de remplacer les hydrocarbures dans le transport automobile et aérien.

Il se peut toutefois que plus tard les moyens de transport légers fassent en grande partie appel à l'hydrogène qui ne pollue pas l'atmosphère et dont l'approvisionnement pourrait être centralisé, surtout si les théoriciens parviennent à réaliser leur rêve d'obtenir de l'hydrogène métastable sous une forme métallique suffisamment durable.

De tels changements, que rendrait possible un recours étendu à l'énergie nucléaire, réduiraient sensiblement la consommation d'oxygène et, partant, les dégagements de gaz carbonique et autres gaz dont les effets, quoique locaux, ne sont pas à négliger. Cette évolution peut revêtir une importance décisive pour le développement industriel à venir. Le bilan de combustible étant ce qu'il est à l'heure actuelle, la quantité d'oxygène utilisée par la combustion est à peu près cinq fois supérieure à celle consommée par toute la population du globe. Sur les territoires de nombreux pays industrialisés, sa production par la photosynthèse est bien moindre que sa consommation et ces pays ne peuvent subsister que grâce à l'apport d'oxygène des régions équatoriales et des océans où sa production par photosynthèse dépasse les quantités consommées. Le problème de l'oxygène sera sensiblement allégé par le recours à l'énergie d'origine nucléaire.

On peut conclure de ce qui précède qu'un développement rapide de l'énergétique nucléaire qui répondrait à la plupart des besoins en énergie sous toutes les formes sera d'un grand bienfait pour l'ensemble de l'humanité et permettra de résoudre de nombreux problèmes critiques.

Il importe de déterminer dans quelle mesure ce développement peut être freiné par les ressources disponibles en combustible nucléaire.

Les renseignements publiés sur les réserves d'uranium et de thorium ne reflètent nullement la situation réelle.

En effet, plusieurs années d'activité frénétique en matière de prospection et de mise en valeur des gisements d'uranium ont eu pour conséquence que l'offre sur le marché mondial a dépassé la demande. L'exploitation de certains gisements a donc été abandonnée, la prospection géologique ralentie et les efforts se sont orientés principalement vers une exploration plus intensive des réserves exploitables déjà connues. Ce n'est qu'en Australie et en Afrique qu'on a découvert de nouveaux gisements importants d'uranium à bon marché.

Dans plusieurs pays d'Europe ainsi qu'aux Etats-Unis et au Canada, les réserves d'uranium ont été étudiées de façon plus approfondie que dans d'autres régions du monde, mais même dans ces pays, on ne dispose de renseignements, d'ailleurs plus ou moins sûrs, que sur l'uranium le moins coûteux, dont le prix ne dépasse pas 22 dollars le kilogramme d' $U_3O_8$ , alors que l'évaluation des réserves d'un coût de 22 à 33 dollars le kilogramme d' $U_3O_8$  manque totalement de précision et ne reflète que l'ampleur des dépenses entraînées par la prospection. Les données publiées ne permettent pas d'établir de corrélation entre l'accroissement des ressources en uranium et la hausse du prix, alors qu'il ne fait pas de doute que cet accroissement en fonction du prix devrait être tout aussi important que dans le cas d'autres métaux d'origine géologique semblable. Ainsi, une multiplication du prix de l'uranium par un facteur de 10 permettrait probablement d'inclure dans les réserves exploitables pour le moins 10% des  $4 \times 10^9$  tonnes d'uranium contenues dans les océans.

En outre, on s'intéresserait alors aussi aux énormes réserves d'uranium que renferment les schistes et autres minerais pauvres qui se trouvent en abondance pratiquement partout.

En raison de cette incertitude, il faudrait essayer d'évaluer les ressources en uranium et leur répartition d'une autre façon. On sait que l'uranium est assez répandu dans les roches de la croûte terrestre à une concentration de l'ordre de 1/1000 000, et que ce sont surtout les couches supérieures qui en renferment, probablement jusqu'à une profondeur de 20 km.

Il semble que pour estimer les ressources minimales en uranium on pourrait adopter comme modèle un grand pays dont le territoire présenterait des conditions géologiques variées et aurait déjà fait l'objet de travaux de prospection prolongés et très poussés. Prenons, par exemple, les Etats-Unis d'Amérique: les réserves sûres y étaient évaluées au 1<sup>er</sup> janvier 1973 à 259 000 tonnes et les ressources probables (au prix de 22 dollars le kg d' $U_3O_8$ ), calculées sur la base de données suffisamment sûres, à 538 000 tonnes, plus 70 000 à ce même prix pouvant être obtenues comme sous-produit de l'exploitation de gisements de cuivre et de phosphates, ce qui fait un total de 867 000 tonnes.

Or, étant donné que ce chiffre comporte une augmentation de près d'un quart par rapport à celui d'il y a trois ans malgré le peu d'efforts que les Etats-Unis ont déployés en vue de trouver de nouvelles réserves, on peut en conclure qu'un modèle de ce genre aboutirait probablement à une sous-estimation des ressources mondiales. Celles-ci devraient être, en gros, proportionnelles au rapport entre la superficie des terres émergées et le territoire des Etats-Unis. Abstraction faite de l'Antarctique et des réserves éventuelles des bancs et fonds marins, on peut admettre que les ressources exploitables à un prix de 22 dollars le kilogramme de  $U_3O_8$  sont de l'ordre de 12 millions de tonnes.

Même si l'on néglige la hausse du pétrole, l'énergie d'origine nucléaire resterait, à son niveau actuel, compétitive pour un prix de l'uranium 1,5 fois supérieur à celui de 1972, soit de 33 dollars le kilogramme de  $U_3O_8$ , car son coût n'augmenterait que d'environ 10%. C'est pourquoi, en examinant les ressources, il faut aussi faire entrer en ligne de compte l'uranium appartenant à cette catégorie de prix.

La documentation dont on dispose sur ces réserves est assez sommaire. On ne s'est guère efforcé d'en découvrir de nouvelles pour la simple raison qu'on peut compter sur d'importantes réserves sûres en uranium moins coûteux et que l'offre dépasse encore la demande. Une évaluation grossière faite par analogie avec d'autres métaux d'origine géologique semblable laisse supposer que les ressources exploitables à un coût de 22 à 33 dollars le kilogramme de  $U_3O_8$  peuvent être estimées pour le moins au double de celles d'un prix inférieur, soit à quelque 25 millions de tonnes. Ainsi, sans compter la production de combustible nucléaire à l'aide de réacteurs surgénérateurs, les ressources mondiales utilisables pour le développement de l'énergétique nucléaire au moyen de réacteurs à neutrons thermiques au prix de 33 dollars le kilogramme de  $U_3O_8$  sont probablement de l'ordre de 30 à 40 millions de tonnes si l'on prend comme modèle les Etats-Unis d'Amérique, et de l'ordre de 25 millions de tonnes si l'on choisit comme modèle le Canada.

Au cours des dix prochaines années, il ne faut guère s'attendre à ce que la structure de la production d'énergie nucléo-électrique subisse de grands changements. Jusqu'en 1985, son développement ne dépassera pas le stade initial et la consommation d'uranium sera principalement déterminée par les réacteurs à neutrons thermiques, alors que par la suite l'augmentation de la puissance installée se fera dans une forte mesure à l'aide de réacteurs à neutrons rapides. Pour évaluer l'extension possible de l'énergétique nucléaire dans le monde, on peut se fonder sur le rythme auquel elle tend à augmenter actuellement. De 1970 à 1980, son taux d'accroissement sera de l'ordre de 2,5 à 3 par période quinquennale.

L'évolution prévue pour les périodes de 1980 à 1985 et de 1985 à 1990 suivra une cadence plus lente; on suppose qu'en moyenne la puissance installée ne fera que doubler tous les cinq ans. Si cette tendance se maintient jusqu'en l'an 2000, la puissance nucléaire installée totale atteindra 4 milliards de kW (contre 1 milliard en 1990), correspondant à une consommation d'uranium naturel de quelque 800 000 tonnes par an. Ces chiffres représentent probablement un maximum.

En supposant qu'une centrale a une durée utile de 25 à 30 ans, on peut en déduire que dès les premières décennies du 21<sup>ème</sup> siècle on manquera d'uranium naturel à bon marché pour poursuivre le développement énergétique à l'aide de réacteurs à neutrons thermiques. Mais en ce qui concerne le siècle en cours, une limitation des ressources d'uranium naturel n'est pas à craindre, quelle que soit l'ampleur que peut prendre ce développement, si la prospection des gisements et la capacité de production des mines suivent un rythme analogue. Il ne faut pas oublier qu'entre la découverte d'un gisement d'uranium d'intérêt industriel et sa mise en valeur complète s'écoule un délai de huit à dix ans, de sorte qu'une mauvaise planification risque d'entraîner de graves perturbations dans l'approvisionnement.

Pendant la deuxième phase du développement de l'énergétique nucléaire, qui sera basée sur les surgénérateurs à neutrons rapides, il devrait être en principe possible de surmonter la situation critique créée par le manque d'uranium naturel au siècle suivant, mais durant le siècle en cours les surgénérateurs n'auront guère d'influence sensible sur la consommation d'uranium.

L'extension du programme de réacteurs surgénérateurs et celle de l'énergétique nucléaire dans son ensemble ne pourront jouer un rôle primordial que si ces réacteurs parviennent à fournir du plutonium à un rythme suffisamment rapide pour répondre aux besoins croissants en énergie, en n'utilisant que des déchets d'uranium et une partie du plutonium qu'ils auront eux-mêmes produit. Dans ces conditions, le prix de l'uranium naturel ne devrait pas avoir une forte incidence sur celui de l'électricité produite à l'aide de surgénérateurs, et l'énergie extraite de chaque tonne d'uranium naturel augmentera de 20 à 30 fois. En partant de ces principes, on peut envisager la création de réseaux nucléo-électriques de toute dimension, et être certain que les ressources en combustible nucléaire secondaire seront illimitées.

Cette évolution a été prévue en Union soviétique il y a déjà de nombreuses années. Cependant, on n'a pas encore suffisamment compris son importance primordiale. Ainsi, aux Etats-Unis et dans beaucoup d'autres pays occidentaux, les programmes de surgénérateurs furent pendant de longues années élaborés sans tenir compte du rôle décisif qui incombe au temps de doublement. Le surgénérateur était considéré comme un réacteur qui, pendant sa durée utile de 25 à 30 ans, consomme de 2 à 4 fois moins d'uranium naturel qu'un réacteur thermique, mais on ne voyait pas en lui un moyen de créer une source d'approvisionnement illimitée en combustible pour la production future d'énergie d'origine nucléaire.

Cependant, pour ouvrir la voie à la création d'une énergétique nucléaire réellement importante pendant le siècle à venir, il est certes indispensable que les surgénérateurs, en produisant du plutonium, permettent de construire d'autres surgénérateurs à un rythme suffisamment rapide pour suivre l'essor industriel du pays; il faudrait aussi qu'ils fournissent des quantités de plutonium supplémentaires pour les besoins des réacteurs à neutrons thermiques qui utilisent des déchets d'uranium ou du thorium. De 25 à 50% de la puissance nucléaire installée sera alors représentée par des sources de chaleur à haute température, des centrales d'appoint, des centrales d'intérêt local, etc. qu'il serait commode de doter de réacteurs à neutrons thermiques. Le temps de doublement du combustible qu'il faudra obtenir en Union soviétique pendant la dernière décennie du

siècle en cours est de 4 à 6 ans, compte tenu de fait que la production d'énergie doit doubler tous les 8 ans pour satisfaire aux besoins économiques du pays, et vu la structure du réseau nucléo-électrique à prévoir pour cette époque.

On aurait toutefois tort de croire que les surgénérateurs à neutrons rapides élimineront les réacteurs à neutrons thermiques.

Il serait en effet absurde d'utiliser les surgénérateurs à charge réduite ou comme installations d'appoint, car leur temps de doublement augmentera et ils ne pourraient plus soutenir la concurrence des réacteurs thermiques. Un réseau à structure optimale doit comporter à la fois des surgénérateurs rapides à temps de doublement de 4 à 6 ans, et des réacteurs thermiques. L'importance relative de ces derniers sera inversement proportionnelle au temps de doublement des surgénérateurs. En Union soviétique où la demande d'énergie doit doubler tous les 8 ans, la part des réacteurs thermiques et celle des réacteurs rapides seront égales si le temps de doublement des surgénérateurs est de 4 ans.

Dès qu'apparut la possibilité d'utiliser l'énergie de fission dans l'économie nationale, il fut aussitôt décidé de l'employer pour la production d'électricité.

L'énergie électrique représente 25 à 30% du bilan énergétique des pays industrialisés, de sorte que le développement de l'énergétique nucléaire contribue grandement à surmonter les difficultés dues au transport coûteux de combustibles à longue distance. Cependant, l'implantation de centrales nucléaires dans les réseaux électriques ne constitue que la phase initiale et la plus facile du développement. La production de chaleur pour l'industrie et le chauffage, le recours à l'énergie d'origine nucléaire pour la préparation d'agents réducteurs destinés à la métallurgie et son application à l'industrie chimique sont autant de projets tout aussi importants que la production d'électricité; au cours de ces prochaines années, nous assisterons sans aucun doute à l'application de cette forme d'énergie dans ces nouveaux domaines et serons appelés à y participer.

Les problèmes courants du chauffage urbain peuvent être avantageusement résolus à l'aide de réacteurs à eau légère appartenant aux filières connues.

Cependant, l'industrie du fer et de l'acier dont la consommation d'énergie représente quelque 20% du bilan de combustible, exige une solution spéciale. La température requise est d'environ 1000° et parfois même davantage. Dans le circuit du réacteur la chaleur doit être transportée à l'aide d'une substance chimiquement neutre telle que l'hélium, alors que le secteur métallurgique de l'usine utilise de l'hydrogène comme caloporteur et réducteur. C'est là un problème qui demande à être résolu, car le manque de plus en plus sensible de coke et la pollution de l'environnement nous contraignent à abandonner progressivement la technologie classique fondée sur l'emploi de hauts fourneaux pour la remplacer par des procédés de réduction directe des minerais, et ce sont justement ces procédés qui permettent de tirer facilement parti des possibilités offertes par l'énergie nucléaire. Dans divers pays on s'efforce depuis de nombreuses années à construire des réacteurs à haute température refroidis à l'hélium, et ces travaux ont abouti à la réalisation de réacteurs expérimentaux dont le cœur fonctionne à une température de l'ordre de 1000°C et où la température de sortie du gaz atteint près de 900°C.

Ces réacteurs présentent un grand intérêt économique du fait qu'on peut les utiliser à la fois pour produire l'électricité et de l'énergie thermique à haute température.

Le micro-combustible qui a été élaboré pour ces installations retient relativement bien les produits de fission et permet d'atteindre un taux de combustion très élevé de l'ordre de 100 000 mégawattjours par tonne, après quoi son traitement chimique devient pratiquement inutile, pour le moins en ce qui concerne la production d'énergie nucléo-électrique.

Certes, il subsiste dans ce domaine de nombreux problèmes complexes qui attendent encore leur solution, tels que la réalisation d'échangeurs de chaleur fiables à haute température qui pourraient servir au chauffage de l'hydrogène, l'élaboration d'une protection thermique pour les caissons en béton précontraint, la mise au point de dispositifs de commande calorifuges, la construction (à un stade ultérieur) de turbines à gaz à circuit fermé, etc.

Les travaux sont toutefois déjà bien avancés et il n'existe plus de problèmes fondamentalement insolubles; on construira des réacteurs munis de dispositifs auxiliaires de ce genre à mesure que les échangeurs de chaleur à haute température seront perfectionnés.

Ce procédé a l'avantage de supprimer le rejet de grandes quantités de gaz carbonique et d'anhydride sulfureux, caractéristique des hauts fourneaux, et de fournir du fer ne contenant ni soufre ni phosphore. Les modifications de la technologie de l'énergie nucléaire vers les années 90 seront probablement marquées par la tendance à utiliser à la fois des réacteurs à haute température refroidis par un gaz et des réacteurs surgénérateurs.

Il se peut que la construction de surgénérateurs refroidis au sodium, dont le temps de doublement serait de 4 à 6 ans se révèle difficile, voire irréalisable, car l'adoucissement sensible du spectre des neutrons par le sodium diminue le rapport de régénération. Dans ce cas il sera peut-être avantageux de recourir à un surgénérateur refroidi par un gaz, préférable du point de vue physique; la nécessité de prévoir des contraintes thermiques très élevées risque d'impliquer des pressions élevées et de susciter des difficultés en ce qui concerne le refroidissement en cas d'urgence. Il semble toutefois que cette filière mérite d'être étudiée plus à fond, surtout si l'on tient compte du fait que la diminution du temps de doublement dans les surgénérateurs à caloporteur métallique nous contraindra inévitablement à remplacer les combustibles à base d'oxyde par des matières plus denses à base de carbure, de nitrure ou de métaux, qui sont plus stables dans un milieu d'hélium chimiquement neutre qu'en présence de sodium.

Une question particulièrement grave qui appelle de toute évidence une collaboration internationale est celle du stockage des déchets radioactifs. A l'heure actuelle, ces déchets proviennent en majorité du traitement chimique du combustible irradié.

Dans ce domaine, les pays intéressés devraient effectivement conjuguer leurs efforts, d'autant plus qu'au cours de ces dernières années sont apparues de nouvelles possibilités telles que la fixation du krypton et du xénon radioactifs dans des composés solides, le «brûlage» de certains isotopes dans des réacteurs à flux intenses, etc., et qu'une riche expérience a été acquise notamment en matière de concentration et de stockage des fragments de fission. La répartition des travaux entre les pays désireux de développer leur énergie nucléaire permettrait de réaliser des économies considérables, d'examiner en commun les solutions les plus efficaces et d'assurer leur application universelle. Elle fournirait aussi certaines garanties contre le danger de graves contaminations accidentelles.

Les problèmes posés par l'approvisionnement en combustible des centrales nucléaires, le traitement des déchets radioactifs, la pollution thermique, etc. méritent un effort conjugué de tous les peuples car leur solution permettra d'envisager plusieurs millénaires de développement sans avoir à craindre une crise de l'énergie. C'est là une tâche primordiale, car la pénurie de ressources dont souffre notre planète ne peut être surmontée que par un renforcement du potentiel énergétique de l'humanité grâce à l'exploitation des inépuisables ressources de l'atome.