

QUELQUES PROGRAMMES ATOMIQUES NATIONAUX

Exposés faits au cours d'un débat public organisé par l'AIEA
à l'occasion de la sixième session de la Conférence générale

A l'occasion de la dernière session ordinaire de la Conférence générale de l'AIEA, l'Agence avait organisé, le 20 septembre 1962, un débat public au cours duquel d'éminentes personnalités de six Etats Membres ont évoqué certains aspects importants des programmes atomiques, mis en oeuvre dans leur pays, notamment pour la production d'énergie nucléaire. Ont pris la parole :

M. V.S. Emelyanov, Vice-Président du Comité d'Etat pour l'utilisation de l'énergie atomique, URSS ;

M. G.C. Laurence, Président de la Commission de contrôle de l'énergie atomique, Canada ;

Sir Roger Makins, Président de l'Autorité de l'énergie atomique, Royaume-Uni ;

M. Francis Perrin, Haut-Commissaire à l'énergie atomique, France ;

M. Glenn T. Seaborg, Président de la Commission de l'énergie atomique, Etats-Unis ;

M. I.H. Usmani, Président de la Commission de l'énergie atomique, Pakistan.

Les débats étaient dirigés par M. Sigvard Eklund, Directeur général de l'AIEA.

On trouvera ci-après le texte des exposés des six orateurs, qui ont ensuite répondu à un certain nombre de questions.

Exposé de M. Emelyanov

En Union soviétique, les efforts relatifs à l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques sont déployés sur un large front. Il est très difficile, dans un bref exposé comme celui-ci, de donner une idée de l'extrême variété des travaux entrepris ; aussi me bornerai-je à signaler les tendances les plus marquantes, qui présentent déjà une importance pratique à l'heure actuelle.

Tout le monde est naturellement curieux de savoir où en est l'utilisation des processus nucléaires pour la production d'électricité. En ce moment, l'Union soviétique achève la construction de deux grandes centrales atomiques, l'une, dans le voisi-

nage de Voronej, qui produira initialement 210 000 kW, l'autre, à proximité de Sverdlovsk, dans l'Oural, qui aura, au début, une puissance d'environ 100 000 kW. La construction de ces deux centrales sera terminée d'ici quelques mois.

En plus de ces deux installations, l'Union soviétique construit, en collaboration avec la Tchécoslovaquie, une centrale de 150 000 kW aux environs de Bratislava ; elle en installe une autre de 70 000 kW dans la République démocratique allemande.

La construction de ces centrales nous permettra d'acquérir l'expérience de la solution des problèmes techniques que pose la construction d'un matériel complexe : sécurité des enceintes des réacteurs, des pompes, mise au point de la technologie et de la fabrication des cartouches de combustible, réglage de la puissance et commande de toute l'installation. Dès à présent, l'industrie soviétique a appris à fabriquer du matériel d'un type entièrement nouveau et les matériaux nécessaires à cette fabrication.



M. V.S. Emelyanov

En plus de la construction des centrales atomiques, nous nous attachons à l'étude de divers types de réacteurs : réacteurs refroidis par l'eau, par un gaz, un métal liquide ou un fluide organique ; réacteurs utilisant des neutrons aux énergies les plus diverses, depuis les neutrons thermiques jusqu'aux neutrons rapides. L'an dernier, nous avons mis en

service un réacteur pulsé d'une construction inédite. Pour autant que je sache, c'est le seul réacteur au monde qui soit fondé sur l'emploi des barres en plutonium et d'un disque contenant de l'uranium-235 et tournant à la vitesse de 5 000 tours/minute. Ce réacteur, qui permet d'obtenir, 8,3 fois par seconde, un flux d'une densité de 10^{17} neutrons par cm^2 , présente une très grande importance pour la recherche en physique, notamment pour les études sur la physique de l'état solide.

Les réacteurs que nous avons mis au point servent, non seulement à la production d'énergie, mais encore à des études de chimie sous rayonnements. Nous avons également des réacteurs destinés à la propulsion, notamment à celle des navires.

Je dois dire que jusqu'ici l'exploitation du premier navire nucléaire du monde - le brise-glace Lénine - a donné d'excellents résultats. Nous avons vérifié récemment le fonctionnement du réacteur, qui était resté en service pendant un temps prolongé. L'examen des éléments combustibles a révélé que ceux-ci n'avaient pas subi la moindre modification. On n'y a relevé aucune trace de corrosion. Ces éléments étaient comme neufs, comme si l'on venait de les mettre en place, ce qui nous donne l'assurance que les réacteurs peuvent être utilisés avec succès dans la construction des navires. Il ne faut pas oublier que le brise-glace Lénine a subi des épreuves particulièrement sévères. D'abord, lorsqu'il a quitté Leningrad et a contourné les côtes de Norvège, il a essuyé une violente tempête. Ensuite, la première année d'exploitation a été extrêmement difficile. L'hiver dans le Nord était très rigoureux et la glace atteignait une épaisseur de 2,5 mètres. Or, le brise-glace a parfaitement résisté à toutes les rigueurs de l'hiver et les vérifications ont indiqué que le réacteur était en excellent état. Nous pouvons donc être certains, comme le montre l'expérience, que l'énergie atomique trouvera son application pratique dans la construction navale.

Lorsque nous aurons fait le bilan des divers essais et obtenu les résultats pratiques de notre expérience en matière de construction et d'exploitation des nouvelles centrales atomiques, nous élaborerons le programme des travaux futurs dans le domaine de l'utilisation de l'énergie dégagée par les processus nucléaires. Dans notre pays, il existe dès à présent des régions où l'utilisation de l'énergie atomique peut se justifier sur le plan pratique. Cependant, pour évaluer les possibilités qui s'offrent à l'introduction de l'électricité d'origine nucléaire dans une région donnée, il est indispensable de procéder à une étude technique et économique détaillée de cette région, compte dûment tenu de toutes ses ressources énergétiques et de la possibilité d'y amener du dehors d'autres types de combustibles. Ce n'est qu'à la suite d'une telle étude que l'on pourra déterminer si la cons-

truction d'une centrale atomique dans cette région est rentable ou non. Il existe en Union soviétique certaines régions où l'énergie d'origine nucléaire est d'ores et déjà concurrentielle.

Exposé de M. G.C. Laurence

Au Canada, comme dans la plupart des pays, la demande d'électricité s'accroît d'année en année. Nous voudrions satisfaire cette demande au moyen de l'énergie atomique, pour la simple raison qu'à notre avis, le prix de l'énergie d'origine nucléaire sera, dans certaines régions du pays, moins élevé que le prix de l'énergie produite à partir du charbon. L'énergie atomique nous offre la possibilité d'abaisser considérablement le coût du combustible. Dans le centre du Canada, le coût du charbon par kilowattheure produit est d'environ 3 mills. Nos centrales nucléaires ne pourront concurrencer les centrales classiques tant que le coût du combustible par kWh ne sera pas sensiblement inférieur à 3 mills. Lorsque je parle de coût du combustible, je veux dire le coût réel, abstraction faite de toute subvention ou de toute valeur de rachat du plutonium. Nous ne saurions attribuer une valeur quelconque au plutonium produit car nous n'en avons pas l'emploi et nous n'avons pas de débouchés pour cette matière.

Etant donné ce qui précède, il est exclu que nous installions dans nos grandes centrales nucléaires des réacteurs où l'économie des neutrons serait mauvaise. Les autres types de réacteurs conviennent pour de très petites centrales, mais pour les grandes centrales leur emploi exige un combustible enrichi, qui est trop coûteux.

C'est là une des raisons qui nous ont amenés à choisir le réacteur à eau lourde. Dans notre première centrale nucléaire, connue sous le nom de CANDU et qui est actuellement en construction à Douglas Point, le coût du combustible par kWh sera inférieur à 1,2 mill et on prévoit qu'il diminuera encore. Notre première centrale nucléaire de démonstration, dénommée NPD, n'a pas été conçue pour être rentable; en fait, elle ne l'est pas. Comme il s'agit d'une usine pilote, une grande partie des dépenses a été consacrée aux recherches. D'ailleurs, étant donné que sa puissance est limitée à 20 MW, elle est trop petite pour être rentable; néanmoins, l'expérience acquise dans sa construction nous permet d'évaluer d'une façon assez exacte le prix de plus grandes centrales de même type. Nous pourrions maintenant construire une centrale de ce type d'une puissance de 50 MW qui pourrait concurrencer dès à présent une centrale alimentée au charbon dans certaines régions du Canada.

Le prix de l'énergie produite par la centrale CANDU de Douglas Point d'une puissance installée de 200 MW, actuellement en construction, sera légèrement supérieur au prix de l'énergie produite par

des centrales au charbon qui existent dans la même région du Canada. Nous prévoyons que les futures centrales de même type produiront de l'énergie au même prix que les centrales au charbon, voire à un prix légèrement inférieur.



M. G.C. Laurence

Notre centrale nucléaire de démonstration NPD n'est en service que depuis quelques semaines. C'est là un temps trop court pour que l'on puisse apprécier à leur juste valeur les résultats obtenus. Tout ce que je puis dire, c'est que la confiance que nous avons mise dans les centrales nucléaires à eau lourde s'est trouvée pleinement justifiée.

En attendant, le Canada continue à étudier des variantes des centrales nucléaires ralenties à l'eau lourde. Un réacteur à eau lourde, refroidi par un liquide organique, sera construit à Whiteshell où se trouve notre deuxième centre de recherches nucléaires, et un réacteur à eau lourde, refroidi par un brouillard d'eau légère, fait l'objet d'études. Des recherches ont porté également sur d'autres aspects du fonctionnement des réacteurs à eau lourde.

Nous pouvons donc nous attendre à produire au Canada d'ici quelques années de l'énergie d'origine nucléaire dans des conditions rentables. Mais je voudrais interrompre cet exposé de l'évolution technologique au Canada pour parler d'une autre question qui, je pense, intéressera l'auditoire.

Nous avons constaté que nos évaluations du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire étaient maintenant beaucoup plus réalistes qu'il y a quelques années encore. De même, nos estimations des dangers que présente l'exploitation des centrales nucléaires deviendront de plus en plus réalistes. Il y a quelques années, un groupe d'experts avait soumis à la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis

un rapport qui exposait les conséquences éventuelles d'un accident nucléaire grave. Beaucoup d'entre vous connaissent ce rapport désigné souvent par Wash/740. Le rapport décrivait des accidents possibles faisant des milliers de victimes et des milliards de dollars de dommages et de pertes financières; c'était un rapport assez effrayant.

Depuis, on a acquis une certaine expérience en matière d'accidents nucléaires. Il y a eu jusqu'ici, dans le monde entier, environ 20 cas où un réacteur s'est emballé, mais dans tous ces accidents, il n'y a eu que six morts; un seul de ces accidents - pour autant que je sache - a entraîné des pertes financières résultant de dommages et d'une contamination en dehors de l'installation. Dans ce dernier cas, la perte financière subie en dehors de l'usine ne dépassait guère quelques centaines de milliers de dollars - nous sommes loin des chiffres cités dans Wash/740.

Bien entendu, nous ne saurions prétendre et nous ne prétendons pas que des accidents plus graves ne soient pas possibles. Nous devons admettre cette possibilité, mais il devient de plus en plus évident que la probabilité en est extrêmement faible. En matière de sécurité, l'industrie nucléaire peut invoquer des chiffres plus favorables que la plupart des autres industries.

Exposé de Sir Roger Makins

Je voudrais dire quelques mots sur les progrès qui ont été réalisés l'année dernière en Grande-Bretagne concernant la mise au point de réacteurs et de génératrices nucléaires. En premier lieu, les huit réacteurs plutonigènes exploités à Calder Hall et à Chapelcross par l'Autorité de l'énergie atomique ont vu leur capacité de production de courant électrique dépasser de 25 % leur capacité nominale. Malgré les arrêts qu'ils subissent pour le remplacement du combustible et bien qu'ils soient largement utilisés pour des expériences, ces réacteurs ont eu constamment un facteur de charge global supérieur à 85 %. Le plus ancien d'entre eux compte maintenant six ans d'une exploitation pratiquement sans histoire et, jusqu'à présent, on n'a constaté aucun signe de détérioration dans aucun de ses éléments constitutifs. Ces réacteurs constituent maintenant des prototypes pour le programme d'énergie d'origine nucléaire en Grande-Bretagne. Les deux premières génératrices nucléaires "civiles", celle de Bradwell et celle de Berkeley, produisent maintenant de l'électricité et ont à elles deux une puissance nominale de 575 mégawatts électriques. Six autres centrales sont en construction et la création de deux autres est autorisée. Lorsque les 10 centrales seront terminées, en 1968, elles auront une puissance totale de 4 500 mégawatts et, fonctionnant comme centrales de base, fourniront environ le huitième de la totalité de l'électricité consommée dans le Royaume-Uni. En outre, 400 mégawatts environ seront fournis par les réacteurs de

l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni et une centrale de 1 000 mégawatts est prévue pour 1969.

Le coût de l'électricité produite par les centrales nucléaires les plus modernes, en 1967/68, serait, d'après les évaluations actuelles, quelque peu supérieur à celui des meilleures centrales classiques actuelles, mais on pense généralement que ces évaluations ont été trop prudentes et que le facteur de charge, la durée d'utilisation du combustible et la durée du réacteur lui-même seront sans doute meilleurs qu'on ne le croit à présent.

Grâce à ces perfectionnements et aux leçons de l'expérience acquise au cours de l'exploitation des grands réacteurs, le coût de l'électricité d'origine nucléaire pourra un jour concurrencer celui des meilleures centrales classiques. On peut apporter encore d'autres perfectionnements aux réacteurs Magnox, mais la nature même du combustible (uranium métallique) et du gainage (Magnox) limite la température à laquelle le gaz de refroidissement peut être porté et, partant, le rendement de la centrale.



Sir Roger Makins

On s'efforce donc de mettre au point des filières nouvelles. Pour les réacteurs refroidis par un gaz, la prochaine étape consistera à passer des cartouches de combustible en métal aux cartouches en oxyde et de la gaine en Magnox à la gaine en acier inoxydable. On y gagnera un meilleur rendement et une construction plus compacte. Le prototype de réacteur à refroidissement gazeux construit à Windscale par l'Autorité de l'énergie atomique comporte ces perfectionnements; destiné à produire environ 30 mégawatts électriques, il a divergé au début du mois d'août et l'on pense qu'il atteindra sa pleine puissance dans les trois prochains mois. Il doit permettre de s'assurer, en premier lieu, que sa charge de combustible donne les résultats escomptés et qu'il pourra ser-

vir de modèle pour la première centrale commerciale. Il constituera également une installation d'irradiation d'une grande souplesse d'utilisation. Cette filière offre la promesse de bonnes caractéristiques de sécurité ainsi que d'une diminution des frais d'investissement et du prix de revient de l'énergie produite.

Le programme britannique de production d'énergie d'origine nucléaire est fondé sur l'hypothèse qu'il sera possible d'utiliser dans des réacteurs sur-générateurs à neutrons rapides le plutonium produit dans ces grandes centrales civiles. Le réacteur expérimental à neutrons rapides de Dounreay en Ecosse, qui a été construit pour étudier la technologie de cette filière, fonctionne depuis deux ans. On s'est heurté à beaucoup de difficultés d'importance secondaire lorsqu'on a voulu en élever la puissance; mais, il y a deux mois, celle-ci a été portée à 30 mégawatts thermiques et on se propose d'en rester là pendant assez longtemps, avant de l'augmenter encore. On ose espérer que les difficultés initiales auxquelles s'est heurtée l'exploitation de ce réacteur sont maintenant surmontées.

En attendant, on poursuit l'étude d'un prototype de réacteur à neutrons rapides pour la production d'énergie électrique. L'Autorité de l'énergie atomique s'intéresse moins aux réacteurs Magnox maintenant que de grandes centrales nucléaires entrent en service et qu'elle est en mesure de se consacrer davantage aux réacteurs ralentis à l'hydrogène.

En ce qui concerne l'eau lourde, on travaille depuis quelque temps en collaboration avec le Canada et la Suède et on se propose maintenant de créer, en étroite coopération avec l'industrie britannique, le prototype d'un nouveau réacteur à eau lourde produisant de la vapeur. Il semble que les frais d'investissement seraient moins élevés et que le combustible n'aurait pas besoin d'un taux d'enrichissement aussi fort que pour les autres types à l'étude. On n'a pas l'intention de refaire en Grande-Bretagne le travail de mise au point mené avec succès dans d'autres pays, mais on pense qu'il est nécessaire d'élargir l'expérience acquise en matière de technologie des réacteurs. Lorsqu'on envisage de nouveaux types de réacteur, on se préoccupe surtout des possibilités de réalisation qu'ils offrent et on s'efforce de choisir ceux qui semblent les plus prometteurs à cet égard.

Enfin, dans le domaine de la propulsion des navires, l'Autorité de l'énergie atomique exécute à l'heure actuelle, en collaboration avec l'industrie britannique, un programme de recherches intensif subventionné par le Gouvernement en vue de mettre au point un réacteur qui pourrait faire concurrence aux moyens de propulsion classiques.

Tout bien considéré, l'année 1962 revêt donc une grande importance pour le développement des réacteurs britanniques.

Exposé du professeur Francis Perrin

La France est parmi les pays qui ont reconnu très tôt l'importance que pourrait avoir l'utilisation industrielle de l'énergie atomique pour l'avenir de leur économie. Nous ne pouvions disposer à cette époque que d'uranium naturel; nous nous sommes efforcés de l'utiliser directement pour la production d'énergie et nous estimons avoir réussi à développer, dans cette voie, un type de réacteur de puissance aussi prometteur que ceux qui utilisent l'uranium enrichi. Les principes de base sont les mêmes que ceux sur lesquels est fondée la production d'énergie nucléaire dans le Royaume-Uni: élément combustible en uranium naturel métallique, gainé d'un alliage à base de magnésium, ralentissement neutronique par du graphite, extraction de la chaleur par du gaz carbonique sous pression; mais les techniques de mise en oeuvre, dans nos deux pays, sont souvent différentes.



M. Francis Perrin

Deux réacteurs prototypes fonctionnent selon ces principes dans notre Centre de Marcoule depuis plus de trois ans et distribuent maintenant sur notre réseau national une puissance électrique totale de 70 mégawatts. Partant de l'expérience ainsi acquise, l'Electricité de France a entrepris de construire une série de réacteurs de plus en plus perfectionnés avec un intervalle de deux à trois ans entre les débuts de construction des réacteurs successifs. Les trois premières centrales sont en construction sur un même site, à Chinon, dans la basse vallée de la Loire. La première, dont le réacteur a divergé pour la première fois il y a quelques jours, doit entrer en service à la fin de cette année avec une puissance électrique nette de 70 mégawatts.

La deuxième, d'une puissance de 160 mégawatts électriques, doit entrer en service au début de 1964, mais ce n'est qu'avec la troisième - la centrale EDF-3 - que nous espérons nous approcher de l'objectif visé, la production d'énergie électrique d'origine nucléaire à un prix compétitif avec celui des centrales classiques. Cette centrale, EDF-3, en construction depuis deux ans, doit entrer en service à la fin de 1965. Sa puissance atteindra 480 mégawatts électriques nets. Une puissance aussi grande est nécessaire pour abaisser au voisinage du coût classique le coût du kilowattheure produit. Elle ne pourrait d'ailleurs guère être dépassée, disons d'ici 1970, pour l'alimentation du réseau de distribution français. Elle a été rendue possible par l'utilisation du béton précontraint pour la construction de l'énorme caisson devant contenir le réacteur sous la pression de 25 atmosphères.

Les perspectives ouvertes par cette troisième centrale EDF sont si favorables que nous estimons qu'une centrale peu différente, comportant les quelques perfectionnements qu'il est déjà possible d'envisager, dont la construction pourrait commencer en 1963 et qui serait mise en service vers 1968, serait pleinement compétitive et pourrait être le prototype d'une série d'autres centrales qui permettraient à l'énergie nucléaire de prendre une place rapidement croissante dans la production d'électricité en France.

Mais nous savons que cette première génération de centrales électronucléaires, quelque prometteuse qu'elle soit et quelque important que doive être son développement, ne pourra pas être conservée pendant une période très longue. En effet, ces centrales et les principes qu'elles utilisent - et ceci est vrai d'ailleurs pour les centrales à uranium un peu enrichi qui sont mises au point par ailleurs - ne pourront, au mieux, utiliser que 1 % environ de l'uranium naturel. Un tel rendement est tout à fait insuffisant pour que d'ici la fin du siècle l'énergie atomique puisse effectivement devenir une source importante d'énergie pour l'humanité. Il faut que d'ici 15 ou 20 ans soient développées des centrales fondées sur le principe de la surgénération (breeding). Les réacteurs surgénérateurs doivent utiliser le plutonium comme combustible et exigent la mise en oeuvre de techniques difficiles. Nous avons, en France, entrepris un effort important de recherche et de développement dans cette voie en commençant la construction, dans notre Centre de Cadarache, d'un réacteur qui mettra en oeuvre les principes de la surgénération, le réacteur Rhapsodie, qui n'aura qu'une puissance thermique de 10 à 20 mégawatts, mais qui permettra déjà d'envisager la mise au point de nombreuses techniques, en particulier celle de l'utilisation du plutonium comme combustible et du sodium fondu pour l'extraction de la chaleur.

L'ampleur de l'effort ainsi déployé et les longs délais nécessaires avant qu'il soit rentable nous ont

incités à développer, à partir de cette année, la collaboration avec Euratom. Cette collaboration permettra de mettre en commun les ressources techniques et industrielles des Etats de la Communauté pour le développement de cette filière prometteuse à long terme, mais dont la mise au point, dans un délai de 15 ou 20 ans, exigera un très grand effort industriel.

Exposé de M. Glenn T. Seaborg

Je ne savais pas trop sur quel aspect du programme d'énergie nucléaire des Etats-Unis je devais insister, mais j'ai eu l'impression que vous seriez peut-être intéressés par notre programme d'énergie nucléaire dans l'espace. On étudie actuellement, aux Etats-Unis, deux applications générales de l'énergie nucléaire au domaine spatial; je vais les exposer successivement l'une et l'autre.

La première consiste dans la mise au point des fusées nucléaires. Elles présentent de nombreux avantages par rapport aux fusées à combustible chimique et permettent d'accomplir certaines missions qu'il serait impossible de mener à bien avec les autres. Grâce aux fusées nucléaires, on peut par exemple transporter de lourdes charges vers la lune et, même au-delà, vers les planètes les plus proches. Ainsi, on pourrait envisager de lancer un engin spatial avec un équipage de plusieurs personnes à destination de Mars; compte tenu d'un séjour d'exploration d'un mois environ, le voyage aller et retour durerait à peu près un an. Les fusées nucléaires sont plus avantageuses que les fusées à combustible chimique car elles ont une plus forte poussée par kilogramme de combustible débité à la seconde. La poussée spécifique d'une fusée nucléaire représente environ le double de celle que peut atteindre une fusée chimique, soit environ 360 kg de poussée par kilogramme de combustible débité à la seconde.

On sait que la fusée chimique est poussée par les gaz chauds produits par la combustion. Dans le cas de la fusée nucléaire, on peut choisir le combustible que l'on désire chauffer; or, l'élément le plus efficace à une température donnée est précisément celui qui a le poids moléculaire le plus faible, c'est-à-dire l'hydrogène. Le propulseur nucléaire consiste en un réacteur compact qui permet de porter l'hydrogène transporté à l'état liquide à des températures très élevées, de manière à obtenir la poussée spécifique maximum. Cela pose, bien entendu, des problèmes complexes de matériaux, car il faut que le réacteur résiste à toutes les températures allant de celle de l'hydrogène liquide jusqu'aux températures extrêmement élevées de l'hydrogène gazeux que l'on cherche à utiliser en l'occurrence.

Des essais d'un réacteur nucléaire de ce genre ont été effectués au centre expérimental du Nevada et les résultats semblent très encourageants. On espère pouvoir tenter en 1967 le premier vol d'essai d'un vé-

hicule spatial à propulsion nucléaire. Quant aux missions à grande distance utilisant ce mode de propulsion, on ne pourra probablement pas les réaliser avant 1970.

La deuxième application de l'énergie nucléaire dans le domaine considéré est son emploi comme source d'énergie auxiliaire pour les véhicules spatiaux. Un certain nombre de génératrices de ce genre ont été mises au point aux Etats-Unis, dans le cadre du programme SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power). Il en existe deux types. Il y a d'abord celles dans lesquelles l'énergie est produite par la désintégration de radioisotopes. Dans ce programme d'ensemble, on emploie des radioisotopes tels que les produits de fission suivants : strontium-90, césium-137, cérium-144 et plutonium-238. La conversion en électricité de la chaleur résultant de la désintégration radioactive (de plutonium-238) a été utilisée dans les satellites Transit, dont l'un tourne actuellement autour de la terre et envoie des signaux transmettant des renseignements utiles à la navigation. Il existe un autre isotope transuranien - le curium-242 - dont on envisage l'emploi comme source d'énergie dans une fusée lunaire.



M. Glenn T. Seaborg

Dans ces sources d'énergie d'origine nucléaire, la chaleur résultant de la désintégration des radioisotopes est transformée en électricité au moyen de dispositifs thermoélectriques. Pour la mise au point de la plupart de ces engins, on étudie également la méthode, plus efficace, de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique par le processus thermoionique. Ces sources isotopiques d'énergie développent une puissance de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de watts; elle peut atteindre quelques kilowatts, mais c'est probablement là le maximum que l'on peut obtenir de ces appareils

relativement simples, si l'on ne veut pas avoir à utiliser des quantités de substances radioactives extrêmement élevées. Bien entendu, ces sources d'énergie d'origine nucléaire peuvent trouver des applications très utiles sur la terre aussi bien que dans l'espace.

Le deuxième type de génératrice SNAP utilise non pas une source isotopique mais un réacteur nucléaire compact refroidi par un métal liquide, ce qui permet d'avoir une puissance de plusieurs kilowatts à plusieurs mégawatts et même, on l'espère, plus élevée encore. On étudie actuellement divers systèmes : l'un, d'une puissance de 500 watts, fondé sur la conversion thermoélectrique, dont on prévoit l'essai en vol d'ici un an ou deux ; un autre capable de produire un courant électrique de 3 kilowatts à l'aide d'un turbogénérateur ; un autre encore, analogue à celui de 3 kilowatts, mais plus compliqué et pouvant produire entre 30 et 60 kilowatts. Enfin, on a entrepris l'étude préliminaire d'un réacteur qui développera une puissance de 100 à 1 000 kilowatts ou davantage. Il s'agit là d'une entreprise extrêmement difficile car, pour atteindre les objectifs visés, il faut un réacteur d'une longue durée d'utilisation et d'un poids assez réduit (4, 5 à 9 kilogrammes par kilowatt). Ce réacteur sera lui aussi fondé sur le principe du refroidissement par un métal liquide.

Ces appareils plus puissants seront utiles pour la propulsion électrique. Il s'agit d'un système de propulsion dans lequel les ions sont chassés à l'arrière de la fusée, sous l'action de champs électromagnétiques qui les accélèrent, ce qui donne une poussée faible en valeur absolue mais élevée par rapport au poids, et permettra peut-être d'aboutir en fin de compte au système le plus efficace de propulsion nucléaire.

Ces appareils permettront aussi d'envisager la télévision mondiale, grâce à l'emploi de satellites placés sur une orbite relativement fixe, à quelque 35 000 km de la terre. Les particuliers pourraient ainsi capter les émissions en direct, alors que les programmes relayés, par exemple, par Telstar doivent être captés au sol par un appareil très sensible avant d'être ensuite retransmis.

Exposé de M. I.H. Usmani

C'est avec plaisir que je saisis cette occasion pour exposer le point de vue de plusieurs pays sous-développés au sujet du rôle que l'énergie d'origine nucléaire est appelée à jouer dans leur économie, notamment dans celle du Pakistan.

Vous serez peut-être surpris d'apprendre qu'en Asie, non compris la République populaire de Chine la quantité de combustible fossile disponible par habitant ne dépasse pas le cinquième de ce qu'elle est aux Etats-Unis et au Canada et le dixième de ce qu'elle

est en Europe occidentale. Ainsi, en Asie et, j'en suis sûr, dans certains pays d'Afrique, l'énergie nucléaire apparaît comme le seul moyen de faire face à la demande croissante d'électricité créée par les programmes nationaux de développement économique. Certes, nous nous trouvons devant ce paradoxe qu'à l'heure actuelle la technologie de l'énergie d'origine nucléaire reste l'apanage des pays qui en ont le moins besoin parce qu'ils possèdent d'importantes réserves de combustibles classiques qu'ils peuvent exploiter alors que nous, pays sous-développés, n'en avons point. Par bonheur, grâce aux recherches faites dans les pays avancés, de nombreux modèles de génératrices nucléaires ont donné d'excellents résultats ; elles peuvent être installées n'importe où dans le monde moyennant l'existence d'une modeste infrastructure industrielle et d'un minimum de main-d'oeuvre spécialisée, ce que, me semble-t-il, la plupart des pays en voie de développement auront acquis avant 1970, avec l'aide de l'Agence.



M. I.H. Usmani

On fait souvent valoir que, puisque l'énergie d'origine nucléaire n'est pas encore concurrentielle dans les pays techniquement avancés, elle ne saurait à plus forte raison l'être dans les pays sous-développés. C'est là, à mon avis, un argument puéril du fait que la concurrence est une notion toute relative et que ce terme prend un sens différent selon les situations. Dans beaucoup de pays, comme dans le mien, l'essor économique se trouve freiné par le coût élevé du combustible et par l'hémorragie de devises étrangères qu'entraîne l'achat des combustibles importés. Aussi avons-nous décidé d'entreprendre un programme très modeste de construction de centrales nucléaires dans les deux parties du Pakistan.

Permettez-moi maintenant de citer quelques faits et quelques chiffres. Tous les experts conviendront, j'en suis sûr, que s'il existe un indice du de-

gré de développement économique d'un pays, c'est bien la consommation d'énergie par habitant. Voici les chiffres pour certains pays, que je cite de mémoire. En Norvège, la consommation annuelle d'énergie par habitant est de 7 000 unités, aux Etats-Unis et au Canada elle est de l'ordre de 5 000, au Royaume-Uni et en France de 2 000 et au Japon de 900 environ.

Prenant le Pakistan à titre d'exemple d'un pays sous-développé, je dois dire, à mon grand regret, que lors de son accession à l'indépendance en 1947, il y a une quinzaine d'années, la consommation d'énergie par habitant y était de deux unités. Elle s'est élevée à 18 unités en 1957 et atteint à l'heure actuelle (1962) 34 unités. Il s'agit maintenant de savoir quelle sera l'évolution ultérieure. Même en admettant que le développement suive un rythme très lent, c'est-à-dire que la consommation d'énergie par habitant double en 10 ans - ce qui correspond du reste à la moyenne mondiale - les calculs montrent qu'au bout d'une quarantaine d'années le Pakistan occidental aura besoin à lui seul d'une capacité de production d'énergie de l'ordre de 23 millions de kW et le Pakistan oriental de 7 millions de kW.

La population pakistanaise atteint actuellement 94 millions d'habitants ; elle s'accroît à un rythme d'environ 2,34 % par an, c'est-à-dire avec une rapidité extraordinaire qui est le propre de beaucoup de pays d'Asie. Si nous entendons assurer un développement économique régulier et maintenir le rythme actuel au cours de la prochaine décennie, il est absolument indispensable d'augmenter la capacité de production d'énergie. La question est de savoir de quelles ressources énergétiques nous pouvons disposer.

Le Pakistan occidental a un potentiel hydroélectrique évalué à environ 15 ou 20 millions de kW, mais la plupart de ces ressources se trouvent dans les régions montagneuses extrêmement peu accessibles de l'Himalaya du Nord, d'accès si difficile, même, que quiconque s'y aventurerait pour étudier ce potentiel de plus près y risquerait sa vie !

En ce qui concerne le gaz naturel, nous avons découvert des réserves assez importantes représentant environ 250 milliards de m³. Or, pour utiliser ce gaz, il faut le transporter sur de grandes distances à l'aide de pipe-lines (qui ne sont pas produits chez nous), de sorte que si nous l'employons pour la production d'énergie son coût est aussi élevé que ce-

lui du pétrole importé, soit 38 à 40 cents pour 250 000 kcal. Cependant, le recours au gaz progresse et je suis heureux de pouvoir déclarer que, dès à présent, 35 % de la quantité totale de gaz consommée sert à produire de l'électricité. Comme vous le savez, le gaz naturel est un produit chimique fondamental qui, outre la propriété qu'il a d'être combustible, peut aussi être utilisé à de nombreuses autres fins. Son emploi le plus important pour notre pays est la fabrication d'engrais chimiques. Or, à l'heure actuelle, la consommation annuelle d'engrais au Pakistan est de l'ordre de 7,5 kg par hectare alors qu'elle est de 140 kg pour la même superficie au Japon. Il ne faut donc guère s'étonner que le rendement des cultures de riz, de blé, etc. y soit environ trois à quatre fois supérieur aux nôtres. Il s'ensuit que nous ne pouvons pas brûler le gaz pour produire de l'énergie. Mais même si nous décidions de le faire, les réserves du Pakistan occidental connues jusqu'à présent - il se peut naturellement que l'on en découvre d'autres - équivaldraient à environ 365 millions de tonnes de charbon, ce qui correspond en gros à la consommation du Royaume-Uni pendant deux ans au rythme actuel. Ainsi, nos réserves de gaz naturel ne sont pas aussi riches qu'on le croit généralement. De toute façon, je ne pourrai jamais, quant à moi, donner à mon Gouvernement des conseils tels que si mon fils, qui a maintenant 4 ans, parvenu à mon âge et devenu ingénieur-chimiste ou pétrochimiste, posait un jour la question : "Où donc est passé le gaz du Pakistan ?", on soit contraint de lui répondre : "Ton père l'a fait brûler pour produire de l'énergie". Non, nous ne voulons pas nous trouver dans cette situation.

Le Pakistan oriental ne possède malheureusement aucun potentiel hydroélectrique. Nous disposons d'environ 120 MW pour 51 millions d'habitants, dans une région où la densité de la population est la plus forte du monde. On n'y a découvert aucune réserve de gaz naturel qui soit comparable à celles du Pakistan occidental ; on n'y trouve ni pétrole ni charbon, de sorte qu'il faut importer d'Afrique du Sud, de Chine, de Pologne, de l'Inde et de nombreux autres pays près de 80 000 tonnes de charbon par mois pour satisfaire les besoins. Des mesures s'imposent pour remédier à cette pénurie d'énergie ; aussi avons-nous décidé de mettre sur pied, au Pakistan oriental, un modeste programme de production d'énergie d'origine nucléaire. Nous envisageons d'y installer un réacteur de 50 MW, ralenti à l'eau, qui divergerait en 1967 ou 1968 et d'en construire un autre d'environ 100 MW au Pakistan occidental, dans la région de Karachi où le facteur de charge est relativement élevé.