

# EXPOSE DE SIR JOHN COCKCROFT

La période qui s'est écoulée depuis la deuxième Conférence scientifique de Genève en 1958 a été consacrée à accumuler de l'expérience en matière de fonctionnement des premiers prototypes de centrales nucléaires et à construire de grandes centrales nucléaires commerciales, qui entreront en service à grand rendement au début de la période des années 1960 et suivantes. En matière de réacteurs, les progrès ont quelque peu marqué le pas, et aucun type essentiellement nouveau n'a vu le jour. Une des raisons est que l'on s'est rendu compte de la longue durée et de l'ampleur considérable des travaux de recherche et de mise au point nécessaires pour qu'un type nouveau franchisse les différentes étapes qui conduisent à sa production finale et à sa mise en service.

Les expériences de fonctionnement des premiers prototypes de centrales nucléaires - Calder Hall, Chapelcross, Shippingport et Marcoule - continuent à être satisfaisantes. Jusqu'ici, plus d'un milliard d'unités d'électricité ont été produites au Royaume-Uni par les deux centrales nucléaires. Indépendamment du temps nécessaire pour les recharges en combustible prévues, qui a été progressivement ramené de 10 à 5 semaines, les réacteurs ont fonctionné pendant 90 pour cent environ de leur temps de service. Comme il doit être possible, dans les futures centrales, de changer les cartouches en cours de service, il semble qu'il y ait une bonne chance que les centrales puissent fonctionner sous coefficient de charge très élevé, si la demande existe, comme ce sera vraisemblablement le cas pendant un certain temps au Royaume-Uni.

Les principales défaillances enregistrées ont été d'un genre classique, elles n'étaient nullement liées au caractère nucléaire des installations. Une turbine s'est emballée pendant la mise en service de l'installation de Calder Hall, par suite du grippage d'une valve de contrôle. Les moteurs des ventilateurs mobiles de Calder Hall ont eu des pannes, et il y a eu des difficultés au démoulage des pales d'une turbine à Shippingport en raison de la défaillance d'un dispositif de séparation à eau, ainsi qu'une fusion partielle des cartouches à Marcoule.

Les responsables du fonctionnement de la centrale de Shippingport ont indiqué que celle-ci était plus simple à faire marcher qu'une centrale au charbon, et qu'elle pouvait notamment être mise en route et arrêtée plus rapidement. Au Royaume-Uni, nous avons constaté que nous pouvions faire passer



le facteur de charge d'une centrale d'un taux peu élevé à son taux maximum en une demi-heure environ, compte tenu, pour la durée de l'opération, des efforts thermiques ordinaires.

L'expérience acquise a permis de surmonter maintes difficultés technologiques concernant l'énergie d'origine nucléaire. C'est ainsi que nous avons constaté que l'accumulation d'énergie dans le graphite, qui risquerait de provoquer des accroissements spontanés de température si on la laissait se développer indûment, peut être considérablement réduite en augmentant la température de fonctionnement du graphite. Les réactions chimiques entre le graphite et le  $\text{CO}_2$  chaud ont eu l'effet attendu et ne nous donnent pas de difficultés. Les expériences consistant à provoquer des oscillations dans le débit des réacteurs ont montré qu'il n'existe aucun problème de contrôle sérieux, mais qu'il faudra renforcer les dispositifs de contrôle dans les très grands réacteurs de l'avenir.

## Problème des taux de combustion

Le principal problème technologique qui subsiste est celui des taux de combustion. Nous avons pu faire produire aux combustibles nucléaires la quantité maximum de chaleur que permettent les limites de la réactivité. Nous savons maintenant que, lorsque nous parlons de taux de combustion de 3 000 MW/jour par tonne pour les cartouches d'uranium métal ou de 10 000 MW/jour par tonne lorsque le combustible est de l'oxyde d'uranium, ce sont là des chiffres quelque peu arbitraires, car les limites de la réactivité permettent un taux supérieur de 50 pour cent dans certains réacteurs à uranium naturel modérés au graphite, tandis que le taux de combustion dans le cas d'oxyde contenu dans des réacteurs modérés à l'eau ordinaire est limité surtout par le degré d'enrichissement.

Les taux de combustion effectivement obtenus dépendront des efforts déployés par les métallurgistes pour pallier les dommages causés par les rayonnements aux éléments de combustible.

Dans la pratique, l'action des défaillances des cartouches a été très réduite. Au Royaume-Uni, on a enregistré 27 défaillances par 100 000 cartouches pour des taux de combustion allant jusqu'à 1 200 MW/jour par tonne, et leurs causes sont maintenant bien connues. Les responsables de la centrale de Shippingport n'ont signalé qu'une ou deux défaillances de leurs cartouches pendant une année de fonctionnement, et le taux de combustion de l'oxyde d'uranium combustible a atteint des pointes de 10 000 MW/jour par tonne, la moyenne étant de 2 000 MW/jour par tonne. Néanmoins, on déploie de grands efforts en vue de faire porter l'expérience sur des taux plus élevés, qui semblent bien être un des facteurs essentiels de la rentabilité des centrales nucléaires.

On a aussi prêté beaucoup d'attention à la sécurité des centrales nucléaires. On se rend compte à présent, surtout grâce à l'expérience acquise lors de l'accident de Windscale, que le principal danger qu'un réacteur pourrait présenter après un accident résulterait vraisemblablement de la fusion d'un nombre limité de cartouches de combustible, qui aurait pour effet de libérer du radioiode et du radiostrontium, les autres isotopes étant moins importants. Les réacteurs modernes sont beaucoup mieux isolés que ne l'était Windscale, qui ne l'était pratiquement pas en ce qui concerne le radioiode; au pis aller, la proportion qui s'échapperait des centrales modernes dans l'atmosphère serait donc beaucoup moins importante. Dans l'éventualité peu probable où du radioiode serait libéré, l'absorption de cet isotope par l'herbe nécessiterait l'arrêt temporaire des livraisons pour l'alimentation humaine du lait en provenance des fermes avoisinantes, mais ce lait pourrait être donné aux animaux. Il faudrait peut-être aussi déplacer la population dans un rayon d'environ un kilomètre tant qu'il y aurait des fuites de radioiode. Des dangers de ce genre ne seraient pas catastro-

phiques mais, tant que nous n'aurons pas acquis plus d'expérience, il serait sage de se montrer circonspect dans le choix des emplacements pour éviter dans toute la mesure du possible de troubler un grand nombre de personnes.

L'an dernier, on a passé moins de marchés qu'auparavant pour la construction de centrales nucléaires ordinaires. Jusqu'à présent, l'Electricité du Royaume-Uni a commandé 1 875 MW et Calder Hall et Chapelcross en fourniront environ 300 et on se prépare à commander deux autres centrales nucléaires à grand rendement. Aux dernières nouvelles, les chiffres du programme des Etats-Unis s'élèveraient en 1963 à un total d'environ 1 000 MW. L'Euratom prévoit près de 3 000 MW pour 1966. En dehors de l'Europe et des Etats-Unis, seul jusqu'ici le Japon a indiqué qu'il avait l'intention de commander une centrale nucléaire de grande dimension.

## Ralentissement dans la mise en oeuvre de programmes d'énergie d'origine nucléaire

Le ralentissement dans la mise en oeuvre de programmes d'énergie d'origine nucléaire s'explique en partie par la transformation du marché mondial des combustibles. La principale cause de cette transformation semble être le fait que beaucoup d'usines qui fonctionnaient au charbon marchent maintenant au fuel-oil; il en est résulté un excédent temporaire de charbon dans certains pays. Ainsi, au Royaume-Uni, la consommation annuelle de produits pétroliers s'est accrue au cours des huit dernières années d'une quantité équivalente à 20 millions de tonnes de charbon, tandis que le total des besoins d'énergie n'augmentait que d'une quantité approximativement la même.

Un deuxième facteur qu'on relève dans la situation du Royaume-Uni a été l'augmentation du coût estimé de l'énergie d'origine nucléaire, qui s'accompagne d'une diminution du coût estimé des futures centrales alimentées au charbon. En 1958, le représentant de l'Electricité du Royaume-Uni déclarait à Genève que, selon les prévisions de cet organisme, le coût de l'électricité d'origine nucléaire produite dans le sud de l'Angleterre en un endroit éloigné des charbonnages serait à peu près égal au coût de l'électricité d'origine thermique, soit environ 0,6 pence par unité, le taux d'intérêt étant de 5 pour cent. A la suite d'une augmentation des taux d'intérêt et de hausses de prix sur le graphite et d'autres éléments constitutifs, les prévisions actuelles se situent entre 0,65 et 0,7 pence pour l'électricité d'origine nucléaire, alors que le coût estimé de l'énergie produite par les centrales alimentées au charbon a légèrement diminué.

La date à laquelle les centrales nucléaires deviendront compétitives et la mesure dans laquelle elles le seront dépendront beaucoup de la mesure dans laquelle le montant des investissements par

kilowatt de centrale nucléaire diminuera. Au Royaume-Uni, nous avons constaté une diminution de ce montant de l'ordre de 30 pour cent en trois ans. Il est probable que les progrès techniques, tels que le fonctionnement à température plus élevée, entraîneront un nouveau fléchissement d'environ 20 pour cent d'ici à 1966; d'aucuns pensent que des progrès techniques plus grands encore, tels que la mise au point de "couveuses" à neutrons rapides, permettra d'obtenir une nouvelle réduction de 20 pour cent, accompagnée d'une diminution importante des frais de combustible due à la surgénération. Cependant, il se peut qu'aussi longtemps à l'avance - une dizaine d'années sans doute - la boule de cristal de la voyante soit quelque peu obscurcie, de sorte qu'il faut accueillir les prévisions avec des réserves.

Cependant, un facteur joue en faveur de l'énergie d'origine nucléaire de façon à peu près certaine. A l'heure actuelle, les experts sont à peu près convaincus que les prix de l'uranium baisseront et que le chiffre actuel de 12 dollars la livre sera ramené à moins de 8 dollars vers 1965, ce qui pourrait entraîner une baisse du coût global de l'électricité nucléaire allant jusqu'à 10 pour cent. On prévoit d'autres avantages éventuels, tels qu'un taux de combustion accrue et des coefficients de charge supérieurs aux valeurs admises jusqu'à présent.

## Phase temporaire

Si nous ajoutons ces facteurs favorables au fait indubitable que la demande d'électricité dans le monde continue d'augmenter exponentiellement et qu'elle double en dix ans, nous ne pouvons que souscrire à la déclaration du Président de l'Euratom, selon laquelle la récession observée dans la construction des centrales nucléaires ne saurait être que temporaire.

La propulsion nucléaire des navires a fait un pas en avant lorsque le brise-glace soviétique Lénine a été mis en service et nous attendons à présent que les Etats-Unis suivent cet exemple avec le "Savannah". Le problème de l'exploitation économique de navires à propulsion nucléaire est loin d'être résolu, semble-t-il. A Genève, l'année dernière, il a été dit que le Savannah coûterait 15 millions de dollars, contre environ 5 millions de dollars pour un navire à propulsion classique. Ces chiffres montrent bien à quel point il est difficile de réduire le coût de petites centrales nucléaires de façon à les rendre compétitives.

Le problème central de la propulsion nucléaire commerciale réside dans la réduction du montant des investissements. On se rend compte dès à présent, d'après nos études, que cette réduction devra porter sur toute une gamme d'éléments de réacteurs et qu'il s'agit d'une question qui relève en grande partie du domaine de la technologie conventionnelle. Ce problème ne saurait être résolu par aucune illumination nucléaire de l'esprit.

Les travaux entrepris l'an dernier sur le développement de l'énergie d'origine thermonucléaire ont été essentiellement consacrés à l'étude de la physique des plasmas à hautes températures plutôt qu'à la mise au point de réacteurs thermonucléaires. En effet, il est devenu manifeste que le problème-clé de la production d'énergie d'origine thermonucléaire est de pouvoir prévenir, dans les plasmas, la perte d'énergie due aux phénomènes d'instabilité et de rayonnement qui apparaissent lorsque le plasma atteint des densités et des températures intéressantes. On a constaté, par exemple, dans une installation relativement peu importante des pertes d'énergie de l'ordre de 1 000 MW dues au rayonnement ultra-violet causé par des atomes d'impuretés. D'autres pertes sont dues au fait que des électrons sont projetés contre les parois en raison de l'insuffisance du confinement magnétique. Ces pertes ont été signalées dans les machines à striction comme dans les machines à miroir. Il nous reste beaucoup à apprendre sur les propriétés du plasma avant de pouvoir espérer remédier à ce défaut et entreprendre la construction de véritables réacteurs thermonucléaires. Il ne faut pas non plus oublier que les "bouteilles magnétiques" de l'avenir devront résister à des pressions de plasma atteignant 100 atmosphères et que les réacteurs à fission doivent avoir des parois d'acier de plus de 15 cm d'épaisseur pour résister à des pressions de cet ordre; aussi la production d'énergie d'origine thermonucléaire ne sera pas sans poser des problèmes de construction. Je crois donc que mes prévisions antérieures, suivant lesquelles l'énergie thermonucléaire ne pourrait être utilisée avant vingt ans au moins, gardent toute leur valeur.

## Radioisotopes

Les applications des radioisotopes - qui sont comme des sous-produits de l'énergie nucléaire - continuent à se développer à un taux annuel d'environ 20 pour cent au Royaume-Uni. On a récemment pu produire des sources de radio-cobalt de 100 000 curies comme sous-produit du fonctionnement des réacteurs. Ces sources de rayonnements intenses ont déjà trouvé des applications commerciales, pour la stérilisation massive des appareils médicaux, des pansements chirurgicaux et des poils de chèvre utilisés pour la fabrication de tapis. Le Wantage Radiation Laboratory installera bientôt une source de 150 000 curies pouvant irradier deux tonnes de produits à l'heure. La dose atteindra 2,5 millions de rads, quantité létale pour toutes les bactéries. Je crois que les Etats-Unis construisent une installation destinée à recevoir une source de 1 million de curies, qui servira à l'étude de la stérilisation des aliments. Des recherches sur la lutte contre les parasites des céréales ont montré qu'il est techniquement possible d'aménager dans les silos des sources de rayonnements intenses en vue de la destruction des insectes parasites. Au Royaume-Uni, des spécialistes de la lutte contre les parasites étudient actuellement les aspects économiques du

problème. Etant donné que les pertes de céréales causées par les parasites s'élèvent, dans le monde, à plus de 60 millions de tonnes par an, cette application de l'énergie atomique est sans doute appelée à prendre une grande importance.

Je suis certain que les radioisotopes auront beaucoup d'autres applications commerciales de

grande importance. Nous avons pris des dispositions pour que des boursiers de l'AIEA puissent étudier ces problèmes au Wantage Radiation Laboratory; il appartiendra aux différents pays de décider, compte tenu de leur situation particulière, quel usage ils pourront faire, à l'échelon national, de ces nouveaux moyens et de ces nouvelles techniques.

---

## EXPOSE DE M. HOMI J. BHABHA

Je voudrais profiter de cette occasion pour dire quelques mots sur les aspects économiques de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays sous-développés. Plus nous étudions cette question et plus nous nous apercevons qu'il existe des facteurs intéressants dont l'importance n'a pas été entièrement appréciée jusqu'à présent; mais en même temps, le problème devient de plus en plus complexe et varié.

D'une part, l'expression "sous-développé" - j'emploie ce terme dans le sens de pays où la production par habitant est faible - désigne des pays dont le revenu par habitant varie depuis 43 dollars des Etats-Unis jusqu'à quatre ou cinq fois plus, de même que dans le cas des pays dits industrialisés, le revenu par habitant peut varier de 300 dollars environ jusqu'à six fois plus. Les pays sont également très différents par leur superficie et leur population - celle-ci allant de quelques millions à des centaines de millions - et aussi par leurs ressources naturelles en combustibles. Par exemple, les pays du Moyen-Orient sont très riches en pétrole, tandis que la majorité des pays de l'Asie du Sud en sont extrêmement pauvres, à la fois en valeur absolue et plus encore en valeur relative, si l'on calcule par habitant. De même, les réserves en charbon des pays sous-développés varient largement d'un pays à l'autre.

C'est pourquoi il est évident que l'on ne peut formuler aucune généralisation sur la question de savoir si l'énergie atomique est applicable ou non dans les pays sous-développés, sans risquer de commettre certaines erreurs graves, de même qu'il est impossible de généraliser quant à la possibilité d'appliquer l'énergie atomique dans les pays industrialisés.

### Situation dans l'Inde

Je traiterai principalement de la situation dans l'Inde, que nous avons soigneusement étudiée et qui dépend de plusieurs facteurs rendant impossible toute généralisation sur la question de savoir si l'énergie atomique est applicable dans les pays sous-développés.



Contrairement à la Chine, l'Inde possède des réserves en charbon assez limitées. Les réserves certaines sont de 43 000 millions de tonnes environ, bien que les réserves probables soient peut-être trois fois plus importantes. Cependant, ceci ne donne pour les réserves en charbon de l'Inde, par habitant, qu'une valeur égale à un trente-cinquième de celle des Etats-Unis d'Amérique. D'autre part, ces réserves ne sont pas également réparties sur l'ensemble du territoire, mais sont concentrées à peu près dans quatre Etats: 55 pour cent se trouvent dans les Etats du Bengale et de Bihar, au nord-est de l'Inde; 25 pour cent environ se trouvent dans l'Etat de Madhya Pradesh. Sur l'ensemble de la production actuelle, 80 pour cent du charbon provient des Etats du Bengale et de Bihar et 12 pour cent seulement de Madhya Pradesh. Ainsi, de vastes régions de la plaine du Gange, de l'Inde septentrionale et occidentale et de l'Inde méridionale ne possèdent pas de charbon.

Celui-ci doit être transporté, des bassins houillers vers ces régions, à des distances supérieures à 500 milles. C'est ainsi que les centrales thermiques de Bombay et d'Ahmedabad reçoivent le charbon des

Etats du Bengale et de Bihar, situés à une distance de 1 500 milles environ, tandis que Delhi le reçoit de la même région, à une distance de 800 milles. Même lorsque les gisements houillers les plus proches sont entièrement exploités, le charbon doit être transporté à des distances de 500 à 600 milles. Naturellement, cela double ou triple le prix du charbon sur le carreau et entraîne un accroissement correspondant du coût de l'énergie. Cet aspect de la question est bien connu et l'on doit en tenir compte dans la plupart des calculs du coût de l'énergie. Néanmoins, un aspect tout aussi important est le capital requis pour le système de transport du charbon. Ce point est généralement ignoré.

Quand une société privée envisage de construire une centrale électrique, elle ne songe qu'au capital qu'il lui faudra investir, autrement dit au financement de la centrale proprement dite. Elle présume que les fonds nécessaires à l'exploitation de nouvelles mines et à la production du charbon - si la demande existe - seront fournis par un autre groupe et qu'un troisième groupe se chargera d'assurer le transport en trouvant les fonds nécessaires au développement des voies ferrées. C'est pourquoi, le fait qu'une centrale nucléaire coûte plus cher qu'une centrale thermique constitue, aux yeux d'un groupe privé, un facteur très important qui milite contre la première. S'il existe encore, en Inde, de grandes entreprises qui fournissent des quantités notables d'énergie, il n'en est pas moins certain qu'à l'avenir la production d'énergie sera de plus en plus le fait de l'Etat. A l'instar de certains pays d'Europe, tous les chemins de fer de l'Inde sont propriété de l'Etat; de sorte que lorsque l'Etat envisage d'augmenter la production d'énergie, il doit non seulement prévoir les capitaux qu'il lui faudra investir dans la construction de centrales, mais aussi des fonds pour l'exploitation de nouvelles houillères et pour le transport du charbon. Les chemins de fer indiens sont déjà exploités à leur pleine capacité et si l'on construit des centrales importantes dans des régions éloignées des mines de charbon, il faudra inévitablement prévoir des capitaux pour financer la construction de voies ferrées. Nous avons calculé le montant du capital nécessaire en supposant que du charbon de bonne qualité devra être transporté sur une distance de 700 milles environ. Nous avons obtenu le chiffre de 450 roupies, soit 33 livres sterling environ par kW de puissance installée. Ce montant n'est pas négligeable par rapport au coût du kW fourni par une centrale thermique moderne d'un bon rendement. Il représente près de 50 pour cent des immobilisations nécessaires à la construction d'une petite centrale thermique du type qui pourrait être implanté dans plusieurs régions de l'Inde. Je ne m'étendrai pas sur la question des capitaux nécessaires à la mise en valeur des mines de charbon. Je me bornerai à indiquer que, d'après nos estimations, le prix de revient national total du kW installé dans le cas d'une centrale thermique située à quelque 700 milles de la mine de charbon la plus proche s'élève à 1 350 roupies environ (soit 100 livres sterling) pour les grandes centrales et à près de 1 600 roupies pour les petites centrales, contre 1 700 roupies pour les grandes centrales à uranium naturel et un chiffre à peu près égal ou supérieur pour les centrales à uranium enrichi de dimensions comparables.

## Prix de revient de l'énergie

Venons-en à présent au prix de revient de l'énergie proprement dite. Il dépend naturellement du taux d'intérêt qui vient grever le capital investi et de la dépréciation. Plusieurs économistes étrangers pensent que, puisque les capitaux sont rares dans les pays sous-développés, les taux d'intérêt doivent nécessairement être élevés; certains sont allés jusqu'à suggérer des taux aussi exorbitants que 10 pour cent. Néanmoins, le fait est que les gouvernements de 11 Etats de l'Inde ont émis en 1958 des emprunts à 4,5 pour cent s'élevant au total à 500 millions de roupies, qui ont été largement couverts. De même le Gouvernement de l'Inde a émis des emprunts à 3,5 et 4 pour cent qui ont été, eux aussi, entièrement souscrits. Il est donc évident que pour ce qui est des dépenses locales en Inde, nous serions tout à fait fondés à baser nos calculs sur des taux d'intérêt de 4,5 pour cent. Ce facteur ne saurait être négligé lors de la détermination des coûts relatifs d'une centrale nucléaire et d'une centrale thermique. Pour ce qui est de la dépréciation, on peut adopter soit une méthode de reconstitution simple, en supposant qu'une usine a une durée de vie de 20 ans, dans quel cas il convient d'amortir 5 pour cent du coût initial par an, soit la méthode d'amortissement courante, en supposant un intérêt composé de 4,5 pour cent des immobilisations. Dans ce dernier cas, il y a lieu de prévoir 3,29 pour cent par an au titre de la dépréciation. On constatera donc aisément qu'avec du combustible à 300 000 roupies la tonne, soit un peu plus de 20 000 livres sterling, le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire sera de 0,035 roupie (près de 7 mills) le kW, contre 0,036 roupie le kW d'énergie thermique. Nous voyons ainsi que les prix de revient de ces deux types d'énergie, dans les conditions qui règnent actuellement en Inde, sont à peu près analogues.

Quelle est la situation en ce qui concerne l'énergie hydro-électrique? Dans l'Inde, les pluies ont un caractère saisonnier. Elles sont très abondantes pendant trois mois de l'année, alors que pendant les neuf autres mois, la plupart des régions de l'Inde n'en reçoivent à peu près pas. Aussi, pour pouvoir utiliser l'énergie hydro-électrique, faut-il construire de vastes réservoirs pouvant contenir assez d'eau pour fournir de l'énergie toute l'année. Cela suppose des investissements très importants pour la construction de grands barrages. Si l'on considère un certain nombre de projets typiques d'équipement hydro-électrique, on constate que leur coût moyen s'établit approximativement à 1 800 roupies par kW installé. Ce chiffre est aussi élevé que celui des immobilisations pour les centrales nucléaires. Cependant, ces investissements se rapportent surtout à des travaux de génie civil; le coût des turbo-alternateurs ne représente qu'une fraction relativement faible. C'est pourquoi le mieux est de prévoir une capacité de production électrique plus élevée que celle qui pourrait être maintenue toute l'année avec un facteur de charge de 100 pour cent ou même de 80 pour cent. C'est là un aspect nouveau, qui apparaît de façon très frappante si l'on étudie les chiffres relatifs à certains de nos projets hydro-électriques. Par exemple, la puissance installée de la centrale de Keyna est de 240 MW, mais en raison de la pénurie d'eau, la puissance, avec un facteur de charge de 80 pour cent, est de 180 MW seulement. Bien que le coût nominal de

cette centrale soit d'environ 1 380 roupies par kW, le coût effectif avec un facteur de charge de 80 pour cent serait d'environ 1 700 roupies. Il existe dans l'Inde d'autres projets d'équipement hydro-électrique dont le coût effectif par kW atteint 2 200 ou même 2 800 roupies par kW, c'est-à-dire qu'il est supérieur de près de 60 pour cent à celui des centrales nucléaires. Ainsi, si l'Inde veut installer des centrales hydro-électriques, il faut prévoir des dépenses d'équipement considérables, aussi élevées, sinon plus, que pour des centrales nucléaires.

Etant donné le caractère saisonnier des pluies, il faut compléter l'énergie hydro-électrique par l'énergie thermique. C'est ce que montre avec éloquence un rapport établi récemment pour le Gouvernement de l'Etat de Madras :

"Cette analyse montre que, bien que la puissance installée du réseau ait atteint 256 000 kW en 1956, la puissance effective était largement inférieure, s'établissant à 143 000 kW environ. Pendant les années de sécheresse exceptionnelle - et nous en avons connu toute une série récemment - ou lorsque la mousson du sud-ouest est tardive, le contenu de ces réservoirs se trouve épuisé, ce qui exige des réductions considérables de la production. Des réductions ont été ainsi opérées en 1953, 1956, 1957 et 1958 ; cette dernière a atteint 75 pour cent pendant le mois de juin et elle a pratiquement paralysé toutes les industries dans la région desservie par les centrales hydro-électriques."

### **Nécessité d'un démarrage**

Toutes ces considérations ne visent pas à prouver que, dans certaines parties de l'Inde, l'éner-

gie nucléaire est aujourd'hui nettement moins coûteuse que l'énergie thermique ou l'énergie hydro-électrique classiques. J'ai voulu montrer seulement que les dépenses d'équipement nécessaires pour la production d'énergie nucléaire sont tout à fait comparables à celles qui sont afférentes aux ouvrages hydro-électriques et ne sont pas très supérieures aux dépenses que le pays doit faire pour créer des centrales thermiques dans des régions éloignées des mines de charbon. Etant donné que les réserves de charbon et de houille blanche sont limitées et suffiront tout juste à permettre l'expansion nécessaire au cours des 10 ou 20 prochaines années, il est évident qu'il faut entreprendre dès à présent la production d'énergie d'origine nucléaire, afin qu'elle soit en mesure de répondre pour la plus large part à l'augmentation de la demande après 15 ans. A cet égard, je suis à même d'indiquer que nous avons décidé de construire notre première centrale nucléaire, avec une puissance installée d'environ 250 MW, et que les travaux préliminaires ont déjà commencé.

Il se peut que la situation soit complètement différente dans d'autres régions sous-développées. En citant l'exemple de l'Inde, j'ai voulu montrer qu'il faut étudier chaque problème en particulier et ne pas conclure hâtivement que l'énergie d'origine nucléaire ne saurait actuellement être concurrentielle dans les pays sous-développés. J'estime que l'une des tâches de l'Agence est d'entreprendre des études détaillées dans diverses régions sous-développées afin d'établir l'importance des centrales qui seraient nécessaires et de faire une comparaison des aspects économiques dans chaque cas. Cette enquête peut s'avérer très utile, non seulement pour les régions étudiées, mais aussi pour les pays qui seront appelés à leur fournir des centrales, tout au moins pendant les 20 prochaines années.

# EXPOSE DE M. BERTRAND GOLDSCHMIDT

Je souhaiterais, prenant la parole après deux physiciens, vous exposer le point de vue du chimiste en vous montrant, d'une part l'importance du rôle de la chimie et de la métallurgie dans le développement de l'énergie atomique, d'autre part l'influence croissante que vont jouer dans l'industrie - et en particulier dans l'industrie chimique de l'avenir - les radiations et les radioéléments produits dans les piles atomiques.

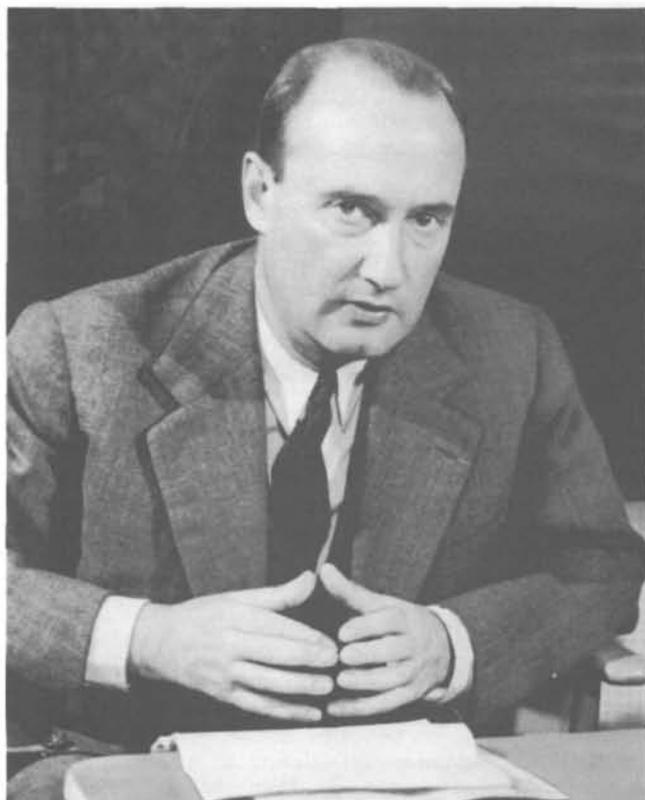
Pour ces deux domaines, il n'y a pas eu de changements importants depuis la Conférence de Genève d'il y a un an et je vais essayer de vous présenter les grandes lignes d'évolution plutôt que des faits nouveaux.

## Industries des matériaux nucléaires

Commençons par la préparation des matériaux nucléaires nécessaires à la construction des centrales atomiques, et du plus indispensable de ceux-ci, l'uranium. En une quinzaine d'années, on a mis au point et développé une considérable industrie minière et métallurgique de l'uranium, dont l'importance en chiffre d'affaires est cette année du même ordre de grandeur que celle de l'aluminium, et qui consomme près de 4 pour cent de la production mondiale d'acide sulfurique. Grâce à cette industrie existante et à la baisse du prix de l'uranium qui en résulte, l'alimentation en uranium dans les 20 prochaines années des centrales nucléaires ne posera pas de problème et le coût du combustible nucléaire sera une faible partie du prix de l'électricité produite.

Cette création n'a été possible que par la mise en jeu industrielle, pour la première fois dans l'industrie chimique minérale, des méthodes d'extraction nouvelles, soit par solvants organiques, soit par résines échangeuses d'ions organiques, méthodes qui ne manqueront pas de servir à leur tour pour l'extraction d'autres métaux de leurs minerais pauvres. En effet, grâce à ces procédés spécialement sélectifs, il est possible aujourd'hui d'extraire l'uranium de minerais abondants, d'une teneur d'une partie pour mille et même moins, à des prix seulement quatre ou cinq fois plus élevés qu'on ne le faisait avant la guerre de minerais rares et exceptionnels plusieurs centaines de fois plus concentrés.

D'autres industries importantes de matériaux nucléaires peuvent être considérées aujourd'hui comme pratiquement au point; ce sont celles du graphite, du zirconium, de l'uranium et du thorium métal nucléiquement purs. Elles aboutissent vis-à-vis de l'élimination des éléments qui absorbent facilement les neutrons, à des degrés de pureté jamais



encore réalisés dans l'industrie; ici encore, la purification par solvants organiques est dans de nombreux cas la méthode de choix.

## Séparation isotopique

Encore plus originales et d'un type inconnu à ce jour sont les usines de séparation isotopique, que nous pourrions appeler usines physico-chimiques, où se répètent parfois à des échelles immenses des centaines et des centaines de milliers de stades successifs de séparation d'espèces d'atomes que la nature nous avait livrés à ce jour comme des jumeaux inséparables: les deux hydrogènes et la production d'eau lourde; les deux uraniums et la production d'uranium enrichi en uranium-235. Des difficultés considérables ont dû être surmontées dans chaque cas; malgré l'existence du secret dans ce domaine, leurs solutions techniques ne manqueront pas de servir progressivement à d'autres branches de l'industrie. La science et la technique industrielle de la séparation des isotopes n'ont guère plus de 20 ans. Il est difficile de

croire que des progrès ne puissent s'y réaliser ; s'ils étaient importants, ils pourraient considérablement affecter le choix des voies de l'avenir et l'économie de l'énergie nucléaire. Cette économie de l'énergie nucléaire dépend, dans l'avenir proche, principalement des progrès qui seront faits dans la tenue des éléments de combustibles nucléaires sous irradiation, le but à atteindre étant des températures de plus en plus élevées des combustibles et par conséquent des fluides de refroidissement qui transmettent l'énergie aux turbines électriques, et une combustion - "burn up" - de plus en plus grande du combustible avant que des déformations trop importantes nécessitent son retrait du réacteur. L'uranium métal pur, comme le plutonium pur, supporte mal les cycles de température et l'effet des rayonnements qui lui font subir de graves déformations, mais certains de leurs alliages avec d'autres métaux, comme aussi leurs oxydes, sont beaucoup plus résistants à ces effets.

C'est par centaines que dans les laboratoires atomiques du monde s'étudient des alliages variés d'uranium, et aussi de plutonium, ainsi que les sortes de céramiques que l'on obtient en frittant, c'est-à-dire en élevant à haute température sous pression, des mélanges d'oxydes métalliques entre eux ou avec d'autres métaux. Ces études sont longues, délicates et coûteuses, et doivent se terminer par des expériences dans des réacteurs d'essai de matériaux, dont le nombre aujourd'hui limité va croître en particulier en Europe par la mise en service prochaine de nouvelles unités. Nous avons ainsi en France beaucoup d'espoir dans la tenue jusqu'à 3 000 mégawatts/jour par tonne de l'uranium faiblement allié par du molybdène ou du chrome, alliages sans doute obtenus aussi dans d'autres laboratoires qui trop souvent gardent le secret sur ce domaine dont l'importance industrielle est évidente.

Il serait infiniment souhaitable que l'Agence puisse jouer un rôle de coordination dans ce domaine, mais hélas on ne connaît pas de véritable moyen de coordonner des recherches autre que de s'assurer un droit de regard en les finançant et, comme vous le savez, notre Agence est bien pauvre. Peut-être un rôle reste à jouer en essayant d'obtenir dans ce domaine la communication et la publication des programmes et aussi des essais infructueux, de beaucoup les plus nombreux.

Je voudrais enfin vous donner un exemple concret de l'importance et de la difficulté des problèmes métallurgiques. Le Royaume-Uni et la France poursuivent tous deux la voie des réacteurs à uranium naturel refroidis au gaz comprimé. Deux prototypes d'un type avancé dans cette voie sont prévus dans nos deux pays : en Angleterre, l'A. G. R. (Advanced Gas Cooled Reactor) modéré au graphite ; en France, le réacteur EL 4, le 4ème de la série modérée à l'eau lourde. Dans les deux systèmes, l'élévation recherchée de la température du gaz de refroidissement nécessite l'utilisation du gainage du combustible nucléaire par du béryllium, métal qui fond à une température beaucoup plus élevée que le magnésium utilisé jusqu'à maintenant. La métallurgie du béryllium en est à ses débuts ; son coût est très élevé : 150 dollars le kilo, en partie à cause du danger que présentent ses poussières qui provoquent des sortes de tuberculoses accélérées. Néanmoins, de la fabrication, de la soudure et de la tenue de ces

tubes mêmes dépend en partie la réussite de ces deux réacteurs.

En cas de succès, il pourrait y avoir création de besoins nouveaux en béryllium ; son approvisionnement, qui se fait facilement aujourd'hui à partir de minerais riches mais assez rares, pourrait alors imposer la recherche de minerais plus pauvres mais abondants, la mise au point simultanée de leur chimie extractive et la mise sur pied d'une nouvelle industrie chimique.

La chimie jouera sans doute aussi un rôle dans certains types de réacteurs d'avenir : dans les uns, par la présence de modérateurs et de fluides de refroidissement organiques, hydrocarbures à haut point d'ébullition résistant aux radiations ; dans les autres, les réacteurs dits homogènes, le combustible nucléaire étant sous forme d'un sel dissous, la solution pourrait, par circulation dans une installation appropriée, être débarrassée de ses produits de fission. Un tel type de réacteur, véritablement chimique et fort prometteur, semble encore très lointain en raison des problèmes de corrosion sous irradiation qui n'ont pas encore pu être résolus.

## Rayonnements et sous-produits radioactifs

Quittons maintenant cette première partie de notre exposé pour aborder celui de l'utilisation industrielle des sous-produits radioactifs et des rayonnements de la réaction en chaîne de l'uranium.

On oublie souvent que la fission de l'uranium n'est pas seulement la découverte d'une source d'énergie plus de 2 millions de fois plus concentrée que le charbon, mais aussi la découverte d'un moyen de réaliser des transmutations à une échelle que les rêves les plus audacieux des alchimistes du Moyen-Age n'auraient jamais envisagée.

La production par transmutation de l'uranium d'un élément nouveau qui n'existe pas sur terre - le plutonium - par dizaines et même centaines de kilogrammes dans les grandes centrales nucléaires de l'avenir en est un aspect étonnant.

Le plutonium servira de combustible de choix dans les réacteurs surgénérateurs de l'avenir, ou réacteurs "breeders", qui permettent la transformation en énergie d'une beaucoup plus grande fraction de l'uranium disponible sur terre. La séparation du plutonium de l'uranium et des produits radioactifs de fission des barres irradiées a nécessité la construction de véritables usines alchimiques entièrement contrôlées à distance, en raison du danger des rayonnements intenses, et dont la conception et le bon fonctionnement continu constituent de véritables tours de force de la technologie moderne. Ici encore, l'extraction par solvant organique est le procédé de choix, qui sera peut-être dans certains cas remplacé dans l'avenir par l'extraction sélective par sels ou métaux fondus, dite pyrométallurgie, dont la mise en oeuvre sous irradiation posera des problèmes industriels tout à fait nouveaux.

C'est encore la chimie qui rend possible le rejet des effluents liquides de telles usines à des concentrations en substances radioactives inoffensives pour la santé, du même ordre de grandeur que les concentrations en radium qui faisaient jusqu'à ces dernières années l'orgueil de nombreuses eaux minérales. Les problèmes, en général d'ordre

chimique, d'élimination des déchets radioactifs prennent une importance sans cesse croissante devant la sensibilité accrue du public à tout ce qui touche la radioactivité du milieu ambiant. L'Agence a un rôle considérable à jouer en édictant des règles internationales qui contribueront à faciliter le développement de l'énergie atomique en rassurant largement le public sur son emploi. Le groupe d'experts et la conférence à venir sur ce problème en sont des premières manifestations de grand intérêt.

En plus du plutonium, les réacteurs atomiques fournissent des quantités considérables de sous-produits radioactifs formés, soit directement par fission au sein du combustible nucléaire, soit par transmutation d'éléments exposés aux neutrons. C'est ainsi qu'ont pu être reconstitués des isotopes radioactifs de tous les éléments connus, espèces nucléaires qui ont dû exister au moment de la formation du globe et disparaître en raison de leur instabilité.

## Utilisation industrielle des sources de rayonnements intenses

Il n'est pas dans mon intention de parler des multiples applications des radioisotopes en science, en médecine et dans l'industrie, mais plutôt de l'utilisation industrielle des sources de rayonnements intenses, domaine technologique plein de promesses, qui commence à se développer. La Conférence que l'Agence vient d'organiser à Varsovie en a montré l'intérêt et je vais chercher à vous en donner rapidement un aperçu en insistant principalement sur les applications à l'industrie chimique.

Les plus fortes sources de rayonnements sont les réacteurs eux-mêmes ; un réacteur de 100 000 kilowatts thermiques est équivalent en rayonnement à quelques centaines de tonnes de radium, tandis que dans les 50 années qui ont suivi la découverte du radium quelque 2 à 3 kilogrammes seulement furent isolés de cette substance dont le gramme est déjà dangereux à manipuler. De tels chiffres montrent la révolution qui est en train de s'accomplir et qui se traduit aussi par les comparaisons de prix : le radium vaut actuellement quelques milliers de dollars le gramme, tandis que la quantité équivalente de radiocobalt ou radiocésium vaut environ un dollar.

Déjà des essais d'utilisation de l'énergie cinétique des produits de fission pour amorcer des réactions chimiques sont poursuivis, spécialement en phase gazeuse, tels que la formation d'oxydes de l'azote et d'acide nitrique à partir d'azote et d'oxygène, ou l'oxydation de produits organiques. Si ces recherches s'avéraient fructueuses, des réacteurs nucléaires seraient peut-être construits un jour aux seules fins de réalisations de synthèses chimiques. Nous sommes en présence de la possibilité d'utiliser en industrie chimique un facteur nouveau d'action - l'ionisation par rayonnement - qui s'ajoutera aux facteurs habituels de température et de pression et nous voyons là poindre à l'horizon une nouvelle branche de la chimie industrielle : la radiochimie.

Pour l'instant les sources de rayonnements intenses utilisées sont tantôt des circuits de métaux fondus irradiés à l'intérieur du réacteur et émettant à leur sortie des rayonnements gamma pénétrants

(comme le mélange de gallium et d'indium dans le réacteur soviétique I. R. T. ), tantôt des installations utilisant le flux de rayonnement pénétrant de barreaux combustibles irradiés en cours de refroidissement, soit enfin des sources de cobalt-60 obtenues par irradiation du cobalt par neutrons ou des sources de césium-137, produit de fission à vie longue, relativement facile à isoler du mélange.

Nous avons au Centre nucléaire français de Saclay une casemate pouvant contenir une large fraction des barres de la pile EL. 3 de 15 000 kilowatts, une partie de cette casemate étant aménagée en chambre frigorifique permettant de faire d'importants essais de conservation alimentaire sous irradiation.

Enfin, lorsque la dose et l'intensité d'irradiation demandées sont relativement faibles et qu'un rayonnement pénétrant n'est pas nécessaire, on pourra utiliser des sources de rayons bêta à partir de plusieurs produits de fission à vie longue, tel le radiostrontium qui trouvera ainsi une véritable utilité démentant sa mauvaise réputation si connue du public. De telles sources sont dès maintenant utilisées pour des modifications industrielles des matières plastiques sous irradiation ainsi que le greffage, c'est-à-dire la soudure de deux matières plastiques entre elles, les deux sortes de molécules brisées sous l'effet des radiations se recombinant entre elles à l'interphase.

Aux Etats-Unis, il existe déjà à l'heure actuelle une production commerciale de polyéthylène irradié qui permet de l'utiliser comme isolant électrique à des températures relativement élevées.

Dans un autre domaine, citons les premiers travaux pour essayer d'abaisser à l'aide de rayonnements la température de cracking des hydrocarbures. On a par ailleurs essayé d'améliorer l'action des catalyseurs par effet d'irradiation, mais les applications en semblent lointaines étant donné que la plupart des effets observés disparaissent par chauffage aux températures exigées par la plupart des traitements industriels.

Ces applications chimiques des rayonnements intenses ne représentent qu'une fraction d'une industrie plus vaste, qui prend déjà un départ sérieux dans les domaines suivants : conservation des aliments, stérilisation des produits pharmaceutiques, stérilisation des insectes en vue de leur destruction, création de nouvelles espèces agricoles par mutations induites, amélioration des vaccins par destruction des microbes et des virus.

## Technologies nouvelles

Ainsi se dessine un ensemble de technologies nouvelles dont la mise au point et la réalisation nécessitent des moyens moins coûteux et qui seront de plus en plus disponibles, permettant ainsi à un beaucoup plus grand nombre de pays d'y prendre part, en particulier à ceux pour lesquels des efforts dans la production d'énergie nucléaire seraient actuellement prématurés. L'Agence pourra jouer ici son rôle en facilitant l'assistance technique aux pays qui désirent s'engager dans cette voie ; le volume ne

cessera de croître dans les années à venir et représentera, parallèlement à la production croissante d'électricité d'origine nucléaire, un domaine indus-

triel qui sera peut-être d'une grande importance et où - comme nous avons cherché à vous le montrer - la chimie et son industrie joueront un grand rôle.

## QUESTIONS ET REponses

*Question posée à Sir John Cockcroft:*

Vous avez parlé des isotopes comme de sous-produits de l'énergie atomique. Ceci est, certes, exact en ce qui concerne les produits de fission mais, à mon avis, ne s'applique pas aux isotopes obtenus sous l'effet d'une irradiation par les neutrons. Etant donné le rôle considérable que les isotopes ont joué en biologie et en biochimie au cours des dix dernières années, croyez-vous que l'on puisse continuer à parler de ces éléments comme de sous-produits de l'énergie atomique ?

*Réponse:*

Ce n'est là, au fond, qu'une façon de s'exprimer; toutefois, en appliquant aux isotopes le terme de sous-produits, je pensais surtout à ceux que l'on obtient dans les réacteurs construits à d'autres fins. En ce sens, ils constituent effectivement des sous-produits obtenus dans des réacteurs de puissance ou d'essai de matériaux. Je n'avais pas l'intention de minimiser le rôle des isotopes. En fait, j'ai souvent déclaré que leurs applications en biologie et en biochimie constituaient pour le moment un des aspects les plus importants de l'énergie atomique.

*Question posée à M. Bhabha:*

Est-il possible de déceler dans la recherche fondamentale des tendances nouvelles qui pourraient amener d'importants changements en matière de physique et de technologie nucléaires ?

*Réponse:*

Je pense que cette question ne peut recevoir qu'une réponse affirmative. Nos connaissances actuelles ne constituent qu'une bien faible partie de celles qu'il faut encore acquérir. C'est tout ce que je puis dire à ce sujet. Comme vous le savez, nous ne sommes pas parvenus à réaliser la conversion directe de l'énergie nucléaire en électricité. Il se peut que l'on finisse par résoudre les aspects fondamentaux de ce problème, ce qui permettrait de produire de l'énergie électrique directement, sans recourir à la méthode actuelle qui n'est au fond qu'un nouveau procédé de porter l'eau à ébullition.

Sir John Cockcroft a ajouté :

Je voudrais seulement faire une observation complémentaire au sujet de la dernière remarque

relative à la production directe d'électricité. Si nous parvenons un jour à construire un réacteur à fusion dont le gaz à très haute température serait conducteur d'électricité, vous pouvez vous imaginer sans difficulté comment il serait possible de le faire vibrer pour transmettre l'énergie directement à un circuit extérieur. Toutefois, il faut commencer par construire un réacteur à fusion.

*Question posée à Sir John Cockcroft:*

Croyez-vous qu'après les premiers progrès spectaculaires, les travaux en matière de fusion thermonucléaire aient abouti à une sorte d'impasse ? Dans l'affirmative, pensez-vous que les difficultés sont telles que l'on ne peut les surmonter sans partir d'une conception entièrement nouvelle ?

*Réponse:*

Je ne crois pas que ces travaux aient abouti à une impasse. Il me semble que nous sommes parvenus à déterminer la nature des problèmes qui se posent, et que c'est là un premier progrès. Quant à l'avenir, j'estime qu'il y a tout lieu de penser que les difficultés pourront être surmontées lorsqu'elles auront été étudiées sous tous leurs aspects.

*Question posée à M. Goldschmidt:*

Comment envisagez-vous l'avenir pour ce qui est du traitement des combustibles nucléaires irradiés ? Croyez-vous que l'on cherchera à limiter les problèmes relatifs à la manutention et au transport de ces combustibles en assurant leur traitement à chaud dans le voisinage immédiat de chaque réacteur, ou bien pensez-vous que ce traitement sera centralisé dans de grandes usines de caractère régional ?

*Réponse:*

A mon avis, il faut distinguer entre uranium naturel et uranium enrichi. Pour l'uranium naturel, il est possible que, grâce aux progrès touchant la combustion et à la baisse continue des prix de l'uranium, on parvienne à un stade où le traitement de l'uranium irradié ne présentera aucun intérêt, sauf dans les cas où l'on veut effectivement obtenir du plutonium ou des produits de fission. Il est certain qu'en l'état actuel

de la technologie, on a intérêt à regrouper les usines de traitement chimique des combustibles irradiés pour plusieurs pays; c'est précisément ce que l'Organisation européenne de coopération économique cherche à réaliser à Mol, en Belgique, avec la participation de 11 pays, en créant la Société Eurochemic. Par contre, en ce qui concerne l'uranium enrichi, dont le transport sera relativement facile, il est possible que l'on continue à le faire traiter dans les pays qui le fournissent, c'est-à-dire principalement aux Etats-Unis, mais que plus tard certains pays souhaitent avoir leurs propres installations, relativement petites, afin de pouvoir procéder sur place au traitement du combustible irradié.

*Question posée à M. Bhabha:*

Quels sont les programmes d'activités, notamment en matière de recherche, que vous recommandez pour les pays qui viennent d'aborder le domaine de l'énergie atomique ?

*Réponse:*

La réponse à cette question doit forcément dépendre des besoins de ces pays, mais il me semble que l'un des plus grands bienfaits actuels du développement de l'énergie atomique est que nous disposons maintenant d'un puissant instrument pour étudier les problèmes fondamentaux de la vie. Nous savons fort peu de choses sur le processus de génération des molécules complexes, protéines, enzymes, etc.; dans ce domaine, les isotopes ont permis d'accomplir en peu d'années des progrès pour lesquels il aurait autrement fallu des décennies. Maints pays, développés ou non sur le plan général, peuvent apporter une contribution scientifique aux connaissances humaines. La liste est longue des hommes originaires de pays dits sous-développés qui ont fait d'importants apports à la science mondiale. Qu'il me soit permis de rappeler, par exemple, celui qui a donné son nom à l'effet de Raman. C'est pourquoi je pense que les divers pays pourraient faire usage des isotopes pour contribuer à leur tour aux grands progrès de la biologie et de la médecine.

*Question posée à Sir John Cockcroft:*

Est-il vrai que les perspectives économiques de l'énergie d'origine nucléaire sont actuellement moins favorables qu'il y a, disons, deux ans ?

*Réponse:*

Je pense que par suite de divers facteurs qui sont peut-être temporaires, tels que l'augmentation des taux d'intérêt et la baisse du prix de revient et des frais de transport du charbon que les Etats-Unis exportent en Europe, la position concurrentielle de l'énergie d'origine nucléaire a été affaiblie d'environ 10 pour cent. En d'autres termes, le prix relatif de cette énergie a augmenté de 10 pour cent depuis un ou deux ans, du fait de ces facteurs. D'un autre côté, nous constatons que la baisse prévue des

prix de l'uranium entraînera sans doute une diminution de 10 pour cent. Il en résultera vraisemblablement un rétablissement de l'équilibre. En outre, les études faites jusqu'ici semblent indiquer que les frais d'équipement des centrales nucléaires dont la construction commencera en 1961 ou en 1962 seront probablement de 20 pour cent inférieurs à ceux que l'on enregistre pour les centrales commandées à l'heure actuelle. Je pense donc que le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire cessera d'être plus élevé, comme c'est le cas actuellement.

*Question posée à M. Goldschmidt:*

Au sujet de l'uranium enrichi, croyez-vous qu'il soit possible de mettre au point des méthodes plus économiques de séparation des isotopes, telles que les méthodes d'ultracentrifugation ? Ensuite, pour ce qui est de l'eau lourde, on a récemment annoncé que le nouveau procédé qui vient d'être mis au point permet de réduire de moitié ou des deux tiers le prix de la production. Que pensez-vous de cette nouvelle ? Si elle est exacte, est-ce que cela ne serait pas un encouragement considérable à la construction de réacteurs à l'uranium naturel ?

*Réponse:*

La technologie de la séparation isotopique n'a qu'une vingtaine d'années; par conséquent, il n'est nullement impossible que des progrès soient accomplis dans l'économie de cette méthode. L'ultracentrifugation, qui est étudiée depuis de nombreuses années et qui a, en particulier, fait l'objet de récentes études en Allemagne et aux Pays-Bas, semble un procédé convenable pour séparer les dernières fractions; mais ce procédé n'est encore nullement au point pour une grande usine, à partir de l'uranium naturel. Quant à l'eau lourde, je suis étonné de la déclaration de M. Spivak qui, si je ne me trompe, a eu de longues discussions au sujet de ses brevets avec le Gouvernement des Etats-Unis. A ma connaissance, c'est le procédé de M. Spivak qui est appliqué aux Etats-Unis et - comme le gouvernement de ce pays l'a déclaré - le prix actuel de l'eau lourde est le prix de revient exact à la sortie des usines. Par conséquent, je suis étonné qu'un tel procédé puisse permettre de produire de l'eau lourde trois fois moins cher. Il est certain que si on pouvait faire de l'eau lourde à un prix trois fois moins cher que le prix actuel, cela donnerait un avantage accru aux réacteurs à uranium naturel/eau lourde.

*Question posée à M. Bhabha:*

Parmi les divers prototypes de réacteurs de puissance, petits et moyens, que l'on met au point à l'heure actuelle, quels sont ceux que vous considérez comme les plus intéressants pour les régions sous-développées, que vous connaissez particulièrement bien ?

*Réponse:*

Le type de centrale dont on aurait besoin dans beaucoup de régions sous-développées serait d'une dimension tellement réduite que la production d'énergie d'origine nucléaire ne serait guère économique, si ce n'est dans des zones très reculées et pour des raisons très particulières. Cependant, dans beaucoup d'autres régions, le type de centrale qui s'impose serait d'environ 50 ou 60 MW. Or, comme vous le savez, ce chiffre représente la limite inférieure pour les réacteurs à l'uranium naturel, sauf peut-être s'ils sont modérés à l'eau lourde. A cet égard, les réacteurs à l'uranium enrichi seraient peut-être plus économiques et il existe plusieurs possibilités parmi lesquelles on pourrait faire un choix. Il y a le réacteur à eau sous pression, le réacteur à eau bouillante et le réacteur à ralentisseur organique; il ressort des divers documents dont j'ai pu prendre connaissance que ces trois types de réacteurs se valent. Je ne crois pas qu'il soit possible en ce moment de porter son choix sur un type unique.

*Question posée à Sir John Cockcroft:*

La transformation directe de l'énergie nucléaire en électricité paraît offrir des possibilités séduisantes. Cependant, peu d'efforts ont été déployés jusqu'ici dans ce sens, en raison du faible rendement que l'on peut attendre de ce processus. Que pensez-vous de ces possibilités ? Ne croyez-vous pas qu'il s'agisse d'une application utile, même si le rendement n'est pas élevé, à condition que les capitaux investis soient très modestes ?

*Réponse:*

L'étude de la transformation directe de la chaleur en électricité se poursuit actuellement dans deux directions : on utilise, d'une part, des semi-conducteurs et, d'autre part, des dispositifs thermoioniques. On a obtenu dernièrement, à l'aide de dispositifs de faibles dimensions, des rendements de 15 pour cent environ et l'on prévoit que si l'on réussit à porter la température de fonctionnement des dispositifs thermoioniques à 2 000 ou 2 500 degrés, ou à des niveaux beaucoup plus élevés encore, on pourra obtenir des rendements allant jusqu'à 30 pour cent. Je crois que ces possibilités offrent beaucoup d'intérêt, mais à mon avis, elles ne connaîtront, au début du moins, que des applications limitées, tant que nous n'aurons pas mis au point des techniques appropriées. On ne saurait, par exemple, prévoir dès maintenant une large utilisation des dispositifs thermoioniques pour transformer directement en électricité une grande partie de la chaleur produite par une centrale nucléaire. Cependant, nous abordons seulement l'étude de ce problème et je ne peux pas dire où nous en serons dans cinq ans.

*Question posée à M. Goldschmidt:*

Pourrait-on transformer en énergie ou utiliser dans l'industrie, en radiochimie par exemple, l'activité dégagée par les déchets nucléaires ?

*Réponse:*

A mon avis, il est certain que les sous-produits radioactifs contenus dans les barres de combustibles nucléaires seront utilisés dans une industrie à créer, une industrie radiochimique. En revanche, je crois qu'il faut répondre négativement à la première question. L'énergie produite par les résidus radioactifs constitue une fraction décroissante et relativement faible de l'énergie produite par le réacteur et, pour l'instant, elle présente plutôt un inconvénient, car il faut refroidir les réservoirs et récipients contenant les déchets radioactifs.

*Question posée à M. Bhabha:*

Estimez-vous que des progrès importants ont été accomplis en matière de fusion depuis la Conférence de Genève de 1958 ? Etes-vous d'accord avec ceux qui affirment, d'une part, que la pleine utilisation des possibilités qu'offre la fission suffirait à répondre à tous les besoins de l'humanité et, d'autre part, que le succès des recherches sur la fusion est trop problématique pour qu'on y consacre beaucoup de temps ?

*Réponse:*

Pour répondre à la première question, je dirais que le progrès essentiel réside dans le fait que l'on a cessé de considérer qu'il s'agissait d'une course de vitesse. On s'est rendu compte qu'il fallait d'abord dégager les données fondamentales du problème, pour le bien comprendre. Ce problème présente deux aspects principaux, à savoir le confinement et la perte d'énergie du plasma. Le changement consiste dans la façon d'aborder le problème. Celui-ci est considéré comme un problème scientifique fondamental et non plus une gageure appelant une solution spectaculaire. C'est là, à mon avis, un progrès important, même si l'on ne peut pas vraiment parler de progrès scientifique.

Quant à la deuxième question, on sait qu'avec la surgénération, qui sera certainement possible dans quelques années, l'énergie totale offerte par les ressources mondiales en uranium et en thorium sera au moins 15 ou 20 fois supérieure à celle qui est contenue dans les ressources en charbon et en pétrole, l'énergie hydraulique ne jouant, de toute manière, qu'un rôle secondaire. Il s'ensuit que la fission pourra certainement fournir, à elle seule, et pendant plusieurs siècles, toute l'énergie dont le monde aura besoin. Cependant, cela ne signifie pas, à mon avis, qu'il faille négliger la fusion, car elle présente certains autres avantages, notamment le fait qu'elle ne produit pas autant de déchets radioactifs que la fission, ce qui, à la longue, peut être très important.

*Question posée à M. Goldschmidt:*

Est-il possible d'éliminer sans danger les déchets radioactifs provenant des centrales nucléaires ? Si cette élimination est possible aujourd'hui, avec un volume de déchets relativement faible, le sera-t-elle encore demain lorsque les résidus seront produits en grande quantité ?

*Réponse:*

Il ne sera pas difficile d'emmagasiner des barres d'uranium irradié et de les laisser de côté pendant 20 ou 30 ans; passé ce délai, leur radioactivité aura considérablement décru et il sera possible de les traiter si l'on a besoin de l'uranium qu'elles contiennent. Au moment où l'on extrait les barres irradiées du réacteur, la radioactivité est très élevée, mais elle diminue très rapidement par la suite. De plus, il est toujours possible de concentrer les produits de fission en un volume relativement restreint et sous une forme solide. Il n'y a pas de raison de penser que l'emmagasinage de ces substances solides puisse être limité. Personnellement j'espère que nous arriverons à un stade où l'on ne traitera les combustibles irradiés que pour en extraire les produits de fission à longue période, qui serviront dans l'industrie radiochimique dont je parlais tout à l'heure. Nous espérons donc qu'à l'avenir les produits de fission et les déchets radioactifs auront un rôle bienfaisant. La manipulation en sera sans doute assez délicate, mais je pense néanmoins que, finalement, ces produits contribueront au développement de l'industrie et de la civilisation.

*Question posée à Sir John Cockcroft:*

En ce qui concerne la production d'énergie, quels sont les avantages comparés, du point de vue a) de la technologie et b) de la rentabilité, des futurs réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides et des réacteurs du type Calder Hall ?

*Réponse:*

Du point de vue technologique, je pense que la principale différence réside dans le fait que le

coeur du futur réacteur serait loin d'atteindre les énormes dimensions de ceux des réacteurs de Calder Hall. Le combustible sera peut-être un mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium; il s'agira donc essentiellement de combustible céramique. La chaleur sera transmise par du sodium liquide, de façon à extraire de grandes quantités de chaleur d'un coeur de très petites dimensions.

Sur le plan technologique, cela pose des problèmes très complexes, car si l'on extrait une plus grande quantité de chaleur d'un coeur de faibles dimensions, les risques d'altérations provoquées par l'irradiation augmentent.

Du point de vue économique, on a dit qu'en raison des dimensions réduites des réacteurs à neutrons rapides, les frais de premier établissement seront d'environ 40 pour cent moins élevés que dans le cas des centrales nucléaires que nous nous apprêtons à construire maintenant. On a dit aussi que, si nous réussissons à obtenir des taux de combustion très élevés, ce qui paraît possible avec l'emploi de ces oxydes comme combustibles, le coût du combustible sera peut-être, grâce à la surgénération, réduit de moitié par rapport au coût actuel. Les réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides permettraient donc de produire de l'énergie à un prix bien inférieur à celui que nous envisageons pour les prochaines années. Tout cela ne pourra naturellement se réaliser que si les premières centrales nucléaires fournissent des quantités suffisantes de plutonium pour alimenter les nouveaux réacteurs. En effet, un seul de ces réacteurs peut exiger une charge d'environ une tonne de plutonium, ce qui, d'après le coût prévu du plutonium obtenu comme sous-produit, reviendrait à environ 5 millions de livres sterling. Si le prix du plutonium était beaucoup plus élevé, les frais d'investissement augmenteraient évidemment en proportion. Par conséquent, les réacteurs à neutrons rapides ne pourront être construits que si des réacteurs à neutrons thermiques fournissent du plutonium comme sous-produit, à un prix relativement peu élevé.