

ont fait l'objet d'un examen détaillé. Des conférences, colloques, semaines d'études et cours d'été ont permis d'étudier et de discuter beaucoup de questions concernant les applications des radioisotopes et des rayonnements, la fusion nucléaire contrôlée, l'élimination des déchets radioactifs, etc.

Toutes ces réunions renforcent considérablement les relations scientifiques. La longue période entre les deuxième et troisième Conférences a été marquée par une intense activité des milieux scien-

tifiques qui s'occupent du problème de l'énergie atomique partout dans le monde. Cependant, toutes les conférences, réunions et colloques des six dernières années ne sauraient remplacer les conférences internationales convoquées par l'Organisation des Nations Unies; en effet, ces dernières montrent de façon particulièrement frappante et convaincante à quel point il importe de détourner l'énergie atomique de la voie qui mène à la guerre pour l'orienter vers celle qui conduit à la paix et au progrès.

BILAN DE LA TROISIEME CONFERENCE DE GENEVE

Au cours d'une réunion d'information, M. Glenn T. Seaborg, Chef de la délégation des Etats-Unis à la troisième Conférence de Genève, a fait le bilan des 10 jours de travail de cette Conférence qui, a-t-il déclaré, a comblé tous les espoirs et nous a menés au seuil de l'ère atomique.

La preuve la plus éclatante des progrès réalisés, a dit encore M. Seaborg, est peut-être l'accroissement de la puissance installée des centrales nucléaires dans le monde : de 5 MW(e) seulement en 1955, elle est passée à 185 MW(e) en 1958 et à près de 5 000 MW(e) en 1964. On prévoit que vers 1970 elle sera de 25 000 MW(e) et qu'elle aura atteint 150 000 ou 200 000 MW(e) en 1980.

Voici légèrement abrégé, le compte rendu de M. Seaborg sur les progrès techniques exposés à la Conférence.

Nombreux sont les délégués à cette Conférence, qui distinguent trois stades dans le développement de l'énergie d'origine nucléaire. Le premier, atteint depuis un an environ, est la mise au point des trois types de réacteurs actuellement rentables : le réacteur refroidi par un gaz et ralenti par le graphite; le réacteur refroidi et ralenti par l'eau lourde et le réacteur refroidi et ralenti par l'eau légère.

Le deuxième stade est celui des réacteurs générateurs améliorés ou perfectionnés, y compris ceux qui s'approchent des surgénérateurs. Cette catégorie comprend toute une gamme de réacteurs utilisant comme ralentisseur l'eau lourde, le graphite, l'eau légère et même un mélange d'eau lourde et d'eau légère en proportions variables. A ce deuxième stade, il sera vraisemblablement possible d'améliorer le rendement du combustible, de préparer plus rapidement le combustible destiné aux surgéné-



L'exposition à Plainpalais (Genève). Les Etats-Unis exposent une station météorologique atomique flottante, destinée à transmettre des rapports. La station est alimentée en électricité par une génératrice nucléaire Snap-7 (Photo CEA-EU)

rateurs, et peut-être même de produire de l'énergie à plus bas prix qu'avec les réacteurs actuels. Toutefois, étant donné les améliorations qui ne cesseront de leur être apportées, les types de réacteurs utilisés aujourd'hui demeureront probablement concurrentiels du point de vue économique pendant presque toute cette seconde phase.

La troisième étape du développement de l'énergie d'origine nucléaire, qui pratiquement coïncide avec la deuxième, est celle de la mise au point des réacteurs surgénérateurs. Au cours de cette Conférence, de longs échanges de vues ont été consacrés aux réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides utilisant le cycle de combustible uranium-238/plutonium.

En revanche, les surgénérateurs à neutrons thermiques alimentés au thorium et à l'uranium-233 n'ont peut-être pas reçu toute l'attention qu'ils méritent. Dans un cas comme dans l'autre, on peut escompter que ces surgénérateurs permettront de doubler au moins le rendement en combustible des ressources mondiales d'uranium et de thorium, car ils produisent plus de matières fissiles qu'ils n'en consomment. C'est essentiellement grâce à eux que nous pourrions libérer l'énergie emmagasinée dans l'uranium-238 et le thorium-232, radioisotopes non fissiles, mais extrêmement abondants.

Maintes voies vers un même but

Tous les délégués ne pensent pas que ces trois phases puissent s'ordonner progressivement de manière à passer des réacteurs actuellement rentables à des générateurs améliorés encore plus avantageux tout en exécutant plus ou moins simultanément un programme à long terme de réacteurs surgénérateurs. Certains délégués estiment que le stade intermédiaire des générateurs est inutile et que les programmes d'énergie d'origine nucléaire des différents pays devraient passer directement à la phase des réacteurs surgénérateurs. L'incertitude des perspectives économiques à long terme des surgénérateurs fait cependant pencher la balance en faveur de l'autre solution, d'un intérêt plus immédiat, qui consisterait, pour de nombreux pays, à mettre au point des générateurs de type amélioré. D'autres délégués pensent au contraire qu'il n'y a pas lieu pour le moment de consacrer de grands efforts aux réacteurs surgénérateurs puisque les réacteurs et les générateurs améliorés du type actuel sont en mesure de fournir de grandes quantités d'énergie pendant des dizaines d'années encore. Si on parvient, comme l'a dit le délégué du Royaume-Uni, à produire de l'uranium à partir de l'eau de mer pour un prix ne dépassant pas 20 dollars la livre anglaise d'oxyde d'uranium, cette thèse sera d'autant plus valable.

Les travaux de la Conférence montrent que l'objectif manifeste de toutes les nations est d'arriver à produire de l'énergie nucléoelectrique en grande quantité et à un prix intéressant. Pour y parvenir, nous empruntons des voies diverses, ce dont il faut se féliciter. Il semble probable que pendant quelque temps encore la production d'énergie d'origine nucléaire sera assurée par plusieurs filières exploitées simultanément. Il y a peu de chances que tel ou tel type de réacteur devienne inutile du jour au lendemain. Il est également improbable qu'un type de réacteur - générateur ou surgénérateur - se généralise, à moins qu'il ne devienne rentable. A mon avis, les surgénérateurs, par exemple, ne seront jamais couramment utilisés si l'on ne parvient pas, grâce aux progrès techniques, à abaisser leur prix de revient au point de les rendre concurrentiels. Il n'est pas exclu, en fait, que les surgénérateurs ne présentent un intérêt économique que si l'on relève suffisamment le prix du combustible.



Une des conférences de presse tenues à la fin des sessions de la Conférence (Photo Nations Unies)

Il ressort des travaux de la Conférence que les efforts visant à rendre l'énergie nucléaire concurrentielle sont actuellement axés sur les grandes centrales d'une puissance de 500 MW(e).

On envisage même de construire des centrales de 1 000 MW(e). Quant à l'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire pour le dessalement de l'eau, on prévoit des centrales d'une puissance de l'ordre de 2 000 MW(e). Mais il faut aussi considérer le cas contraire : tous les pays n'ont pas l'utilisation de centrales de cette taille. Il faut espérer que le développement intensif de l'énergie d'origine nucléaire permettra de mettre au point des génératrices nucléaires rentables de plus modestes dimensions qui répondront mieux aux besoins de la plupart des pays en voie de développement. Les réacteurs nucléaires de moins de 500 MW(e) ont déjà prouvé leur utilité du point de vue économique dans certains de ces pays.

Aspects économiques de l'énergie d'origine nucléaire

J'aborderai maintenant le thème principal de mes observations générales, c'est-à-dire les aspects économiques de l'énergie d'origine nucléaire. Le prix de revient de l'énergie produite par une centrale nucléaire ou classique est essentiellement déterminé par quatre facteurs : le coût de la construction, les frais d'exploitation, les charges financières fixes et les caractéristiques techniques de l'installation qui déterminent sa capacité. A l'exception des charges fixes, ces facteurs ont été étudiés à fond au cours de plusieurs séances de la Conférence. Il est peut-être regrettable que la question des charges fixes n'ait pas

été examinée avec plus d'attention, étant donné que les divergences d'opinions quant aux mérites respectifs des différents types de filières semblent dues en grande partie aux différences entre les charges fixes. En fait, il eût été souhaitable qu'une tentative fût faite à l'échelon international pour normaliser les méthodes de calcul du prix de revient des réacteurs.

A cause de certains facteurs techniques et économiques on ne dispose que d'un nombre limité de types de réacteurs suffisamment au point pour être incorporés dès maintenant dans de vastes programmes d'énergétique. D'après les rapports publiés, les coûts de construction probables des trois types de réacteurs les plus répandus dans le monde à l'heure actuelle ne représentent que la moitié environ des coûts de construction des premiers grands réacteurs.

Le coût de construction varie entre 140 et 280 dollars par kW. Les frais d'exploitation se situent entre 1,3 et 2,8 mills par kilowattheure. En raison de la différence entre les charges fixes d'un pays à l'autre, je n'ai pas essayé d'additionner le coût de la construction et les frais d'exploitation pour établir le prix de revient de l'énergie produite. On notera que lorsque les frais d'investissement d'une filière sont élevés, ses frais d'exploitation sont généralement faibles. Dans les pays qui se sont efforcés de mettre au point des réacteurs utilisant des combustibles peu coûteux les charges fixes sont peu élevées et compensent dans une certaine mesure les frais d'investissement plus importants. En fait, la modicité des charges explique en grande partie la préférence donnée à cette filière de réacteurs. C'est grâce au progrès de leur technologie que ces réac-

teurs peuvent concurrencer dans un même pays les autres sources d'énergie, malgré l'augmentation de certains éléments des charges fixes, notamment les taux d'intérêt, comme l'ont signalé M. Lewis et Sir William Penney. Les effets de cette augmentation ont été particulièrement sensibles dans le Royaume-Uni, où les taux d'intérêt utilisés pour le calcul de la rentabilité des réacteurs est passé de 4 % en 1955 à 7,5 %.

On peut encore accroître considérablement la rentabilité de tous ces types de réacteurs en augmentant leurs dimensions, en en groupant plusieurs dans une même centrale, en les construisant en série et en continuant de leur apporter des perfectionnements techniques comme on l'a fait pour les centrales classiques dont le prix de revient a pu ainsi être sensiblement réduit. On peut citer comme exemple les améliorations apportées par le Royaume-Uni à son programme initial d'énergie, prévoyant une production de 5 000 MW(e) avec des réacteurs Magnox.

Possibilités d'amélioration

L'expérience montre aussi qu'un grand nombre de génératrices nucléaires peuvent fonctionner sans risques à une puissance bien supérieure à leur puissance nominale, ce qui abaisse considérablement les prix de revient unitaires. Ainsi, la puissance du réacteur Yankee, qui était initialement de 110 MW(e) a été portée à 175 MW(e). Cette extension de capacité est également possible avec les réacteurs qui sont à l'étude ou en construction. Par exemple, la centrale d'Oyster Creek a une puissance minimum de 515 MW(e), mais si la densité de puissance prévue est atteinte dans le cœur, sa puissance pourrait atteindre 640 MW(e). L'expérience acquise en URSS avec la première centrale de 210 MW(e) de Novovoronej, a permis de porter à 365 MW(e), et même davantage, la puissance de la seconde centrale qui est une version améliorée de la première. A mesure que de nouvelles données seront réunies, on en viendra progressivement à fixer la puissance initiale des nouvelles centrales à un chiffre plus voisin de celui qu'elles pourront atteindre en marche normale.

Les rapports soumis à la Conférence font également ressortir la possibilité d'apporter des réductions importantes aux coûts du cycle de combustible. Il se peut que ces réductions soient même bien supérieures à la réduction de 50 % des frais d'investissement, encore qu'elle puisse varier selon les types de réacteurs. Les coûts de fabrication du combustible diminueront considérablement à mesure que nous continuerons à parfaire les techniques et à agrandir les installations de production. C'est ainsi qu'au Royaume-Uni, par exemple, on a fabriqué près de deux millions de cartouches Magnox. Il convient également de signaler les efforts déployés en France pour intensifier la fabrication. On espère aussi élever la combustion massique de tous les types de com-

L'exposition de Genève: une partie du stand de l'URSS
(Photo Nations Unies)



bustibles utilisés dans les réacteurs, ce qui permettrait de réduire le coût du cycle de combustible. Là encore, le fait que le taux de combustion massique garanti du combustible ait été porté récemment de 3 000 à 4 000 MW-jours par tonne témoigne des résultats obtenus dans ce domaine. D'autres rubriques des frais d'exploitation, d'entretien et de combustible, tel le traitement chimique du combustible irradié, sont également susceptibles de réductions importantes.

On a également signalé la possibilité de réaliser d'autres économies sur le combustible proprement dit. L'uranium naturel coûte aujourd'hui beaucoup moins cher que l'uranium utilisé dans les premiers coeurs des réacteurs. Le chiffre souvent cité de 6,50 dollars la livre représente probablement un maximum à l'heure actuelle. A la longue, cela contribuera à réduire les frais d'exploitation des réacteurs utilisant à la fois l'uranium naturel et l'uranium enrichi. Le fait que l'amélioration des rapports de conversion permettra d'utiliser des pourcentages croissants de l'uranium extrait se traduira également par une baisse des prix de revient. Toutefois, de même que les réacteurs alimentés à l'uranium naturel exigent au départ des investissements supérieurs, il se peut que certaines de ces réductions possibles du coût du cycle de combustible entraînent une augmentation des dépenses d'investissement.

Les prévisions de la production d'énergie d'origine nucléaire sont peut-être l'élément le plus encourageant qui permette d'escompter une baisse des prix de revient. Il semble certain que l'énergie nucléaire contribuera de plus en plus à l'approvisionnement en énergie de nombreux pays. Son rôle variera d'un pays à l'autre, en fonction de l'importance et du prix des sources classiques d'énergie. A cet égard, le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire sera de la plus grande importance. Il est bien naturel qu'avant de se lancer dans de vastes pro-

grammes d'énergie nucléaire les compagnies d'électricité de tous pays tiennent à s'assurer que l'énergie d'origine nucléaire peut soutenir la concurrence avec l'énergie classique.

L'avenir de l'énergie d'origine nucléaire

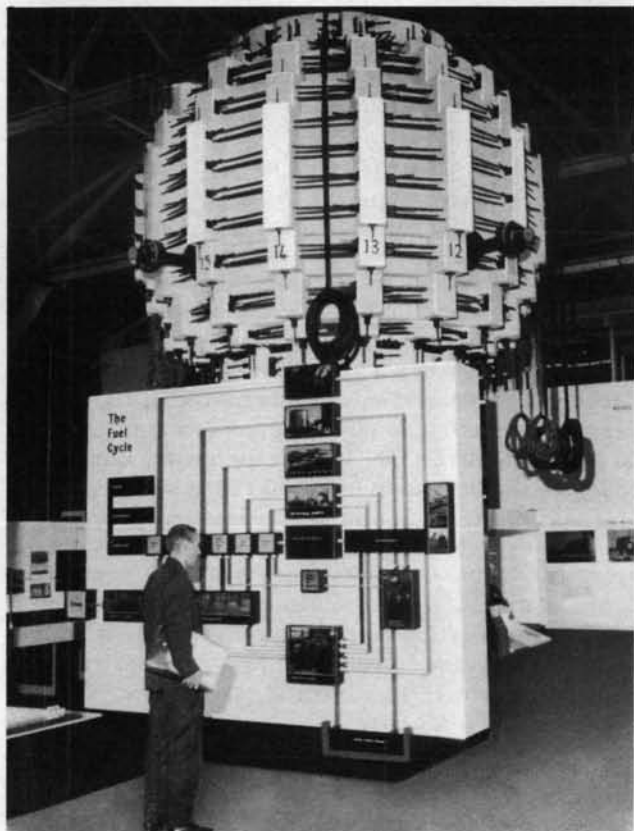
Les types actuels de réacteurs de puissance d'exploitation économique ne représentent qu'une première étape. Les nombreux rapports sur les réacteurs générateurs de demain laissent espérer un meilleur rendement et une consommation plus économique de combustible. Malgré les divergences d'opinions sur les voies à emprunter dans l'avenir, on s'accorde généralement à reconnaître qu'il est nécessaire de mettre au point des générateurs améliorés pour obtenir ce meilleur rendement. Lorsqu'on considère les besoins futurs, on reconnaît en général qu'il faut mettre au point des réacteurs surgénérateurs, bien que certains pays, comme le Canada, soient d'avis que de nombreuses années s'écouleront encore avant qu'il faille recourir éventuellement à de telles installations. L'opinion générale s'exprime d'ailleurs dans les plans et programmes sur lesquels le Royaume-Uni, l'URSS, la France, l'Allemagne et les Etats-Unis ont fourni des renseignements.

On procède actuellement dans de nombreuses parties du monde à l'étude et à la mise au point de divers types de réacteurs générateurs pour l'avenir. Ces réacteurs présentent un certain nombre d'avantages potentiels : taux de conversion élevé, puissance spécifique accrue d'où moindre consommation de combustible, température et rendement thermique élevés, plus grande capacité par unité, meilleure utilisation de l'uranium naturel, du thorium et du plutonium et contribution possible à la mise au point des surgénérateurs. Dans certains cas, la conception de ces générateurs repose sur des variantes développées ou combinées de la technologie de types de réacteurs dont le fonctionnement a donné satisfaction. Dans d'autres cas, elle résulte de techniques nouvelles.

C'est ainsi que les réacteurs modérés à l'eau lourde sont intéressants tant dans l'immédiat que pour l'avenir. Des indications ont été données à la Conférence sur des applications de la technique des réacteurs modérés à l'eau lourde à des modèles actuellement à l'étude utilisant des refroidisseurs tels que les gaz, les composés organiques, l'eau et la vapeur. La formule du réacteur modéré à l'eau lourde et refroidi par une matière organique que l'Euratom met actuellement au point avec le projet ORGEL, ainsi que le projet OCDRE au Canada, le projet DON en Espagne et le programme récemment établi aux Etats-Unis pour l'étude du dessalement, semblent autoriser les plus grands espoirs, de même que les programmes français et tchécoslovaque utilisant un gaz pour le refroidissement et l'eau lourde comme modérateur et les travaux effectués au Royaume-Uni sur le

Discussion amicale au Palais des Nations: de gauche à droite: MM. M.S. Halter, J. Goens et J. Bouquiaux (Belgique) (Photo Nations Unies)





L'exposition de Genève: un panneau sur le cycle du combustible (Royaume-Uni). Au-dessus: maquette du caisson en béton précontraint, pour la centrale nucléaire Wylfa (Photo Nations Unies)

refroidissement par la vapeur. L'ampleur des travaux envisagés avec les composés organiques montre que de nombreux pays ont maintenant assimilé les techniques de manipulation des matières organiques utilisées comme refroidisseurs dans les réacteurs, en réalisant et en maintenant des degrés de pureté satisfaisants dans le système de refroidissement.

D'autres exemples de l'évolution des réacteurs générateurs perfectionnés à partir des types actuels de grands réacteurs de puissance sont constitués par le modèle de réacteur à déplacement de spectre (utilisant un mélange variable d'eau ordinaire et d'eau lourde), les modèles suédois de réacteurs sous pression et de réacteurs à eau lourde bouillante, le système à eau sous pression à régions fertile et enrichie et à surchauffe nucléaire. L'expérience effectuée en Suède pour obtenir un taux très bas de fuite d'eau lourde est fort encourageante. Les travaux sur la surchauffe semblent particulièrement avancés en URSS depuis la mise en marche de la centrale nucléaire de Bieloyarsk.

Réacteurs à neutrons rapides

Des versions perfectionnées de réacteurs modérés au graphite et refroidis par un gaz sont actuellement mises au point afin d'obtenir une température

élevée, un cycle de combustible amélioré et un meilleur taux de conversion. Les principaux efforts en ce sens sont représentés par les projets AGR et Dragon au Royaume-Uni (ce dernier étant une grande entreprise commune de plusieurs pays) et par le projet HTGR aux Etats-Unis.

On a constaté que des efforts importants sont également consacrés à l'étude de réacteurs refroidis au sodium. La mise au point, aux Etats-Unis, du réacteur ralenti au graphite et refroidi au sodium a essentiellement pour objet d'aboutir à un réacteur de grande puissance, à température élevée et d'un fonctionnement économique; en outre, ce travail contribue dans une large mesure à perfectionner la technique du refroidissement au sodium qui s'applique à tous les systèmes de réacteurs rapides refroidis au sodium. Notons que l'installation nucléaire de Hallam, aux Etats-Unis, est dotée du plus grand réacteur de ce type actuellement en exploitation. Dans le cadre de son programme général de réacteurs, l'Allemagne élabore son projet KNK dont le réacteur sera ralenti à l'hydruure de zirconium et refroidi au sodium. Le programme de l'URSS marque également des progrès substantiels concernant certains éléments constitutifs de circuits au sodium.

Les rapports dont on dispose indiquent qu'au cours des dernières années l'intérêt pour les réacteurs à neutrons rapides a grandi d'une façon spectaculaire dans de nombreux pays. L'Allemagne, le Royaume-Uni, les Etats-Unis et l'URSS ont tous déclaré ou réaffirmé leur intention de poursuivre l'étude de prototypes d'assez grande taille d'une puissance de plusieurs centaines de mégawatts électriques. L'URSS et le Royaume-Uni ont communiqué des rapports sur l'expérience acquise dans le fonctionnement des réacteurs à neutrons rapides BR-5 et Dounreay respectivement. La capacité totale de l'installation de Dounreay atteint 9 080 MW-jours et sa production d'énergie électrique est supérieure à 36 millions de kWh. Cette centrale a fonctionné de façon satisfaisante à pleine puissance et son emploi continu, comme installation d'essai de combustibles, devrait faciliter dans une large mesure l'exécution du programme de réacteurs à neutrons rapides du Royaume-Uni.

On a annoncé que le réacteur EBR II, à la Station nationale d'essais de réacteurs des Etats-Unis, produit actuellement de l'énergie et on espère qu'il donnera, de même que l'installation Enrico Fermi, des renseignements précieux sur les combustibles, le comportement des diverses parties constitutives et la sûreté de fonctionnement. On construit actuellement en France le réacteur à neutrons rapides Rapsodie qui fournira de précieux renseignements sur le comportement physique, y compris la cinétique des coeurs de ce type de réacteurs. En Allemagne, le programme se poursuit intensivement et l'on procède activement à l'évaluation des divers refroidisseurs

et des systèmes applicables à la technique des réacteurs à neutrons rapides.

On a beaucoup expérimenté sur le cycle plutonium/uranium-238 en vue d'une utilisation efficace de ces matières grâce aux taux élevés de conversion qui semblent réalisables avec ce cycle. On a procédé à l'évaluation de combustibles métalliques et céramiques afin d'obtenir un rendement élevé et économique. Ces recherches ont conduit à l'élaboration de programmes rationnels d'étude de la neutronique et de la sécurité de ces cycles de combustibles pour réacteurs rapides.

Normes élevées de sécurité

En ce qui concerne l'évaluation du combustible, on procède à l'irradiation d'une série d'assemblages expérimentaux de combustibles dans le réacteur de Dounreay, au Royaume-Uni. On a également irradié du combustible jusqu'à un taux de combustion de 6 % dans le réacteur BR-5, en URSS. Des plans définitifs ont été mis au point pour irradier prochainement des sous-assemblages d'échantillons et de combustibles dans les réacteurs Rapsodie, Fermi, EBR II et dans le circuit à flux rapide du BR-5 de Belgique. En outre, les Etats-Unis construisent un réacteur d'essai à neutrons rapides, le FARET, qui permettra de procéder à d'intéressantes mesures physiques et de faire l'essai de petits coeurs à des densités d'énergie et à des taux de combustion élevés. L'URSS a également annoncé un programme de recherches au moyen du réacteur BR-60 de 60 MW(e), avec lequel elle espère atteindre des taux de combustion supérieurs à 10 %.

En ce qui concerne la sécurité, on procède dans plusieurs pays à des recherches théoriques et expérimentales sur le coefficient Doppler et sur le coefficient cavitaire pour les réacteurs à neutrons rapides au sodium. Les documents présentés et les débats indiquent que l'on est généralement d'accord sur l'influence favorable du coefficient Doppler sur la cinétique et la sécurité des réacteurs. On poursuit des travaux expérimentaux avec les installations critiques ZEBRA, VERA et QUAGGA au Royaume-Uni, ZPR-III et ZPR-VI aux Etats-Unis, BFS en URSS et FR-O en Suède. Un certain nombre d'installations seront mises en service au cours des cinq prochaines années; à savoir MASURKA en France, SNEAK en Allemagne et ZPPR aux Etats-Unis. Un autre projet de réacteur à neutrons rapides est envisagé; il s'agit de SEFOR (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor) dont la construction est entreprise en commun par l'Euratom, la République fédérale d'Allemagne, la "Southwest Atomic Energy Associates" (un groupe d'entreprises américaines), la compagnie General Electric et la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis. SEFOR doit servir à mesurer le coefficient Doppler et le coefficient de température du sodium sur des coeurs constitués par des mélanges d'oxyde

de plutonium et d'uranium, dans des états transitoires.

Bien que l'effort principal, en ce qui concerne les réacteurs surgénérateurs, porte sur les réacteurs rapides refroidis au sodium, les rapports qui sont parvenus indiquent que l'on étudie actuellement d'autres formules de réacteurs utilisant d'autres refroidisseurs, tels les gaz et la vapeur. La délégation suisse a présenté un mémoire décrivant un réacteur à neutrons rapides refroidi par un gaz, et une évaluation de différents types de refroidisseurs étudiés en Allemagne a été communiquée.

On a également présenté des travaux exécutés dans plusieurs pays, qui pourraient aboutir à la construction de réacteurs surgénérateurs à neutrons thermiques utilisant le cycle de combustible thorium-uranium-233. Trois des réacteurs décrits, qui offrent la possibilité d'utiliser les importantes réserves d'énergie actuellement enfermées dans le thorium et peuvent éventuellement devenir surgénérateurs, sont du type à haute température, ralenti au graphite et refroidi par un gaz, du type à eau lourde et du type à eau ordinaire sous pression à régions fertile et enrichie. Il convient également de noter les avantages que peuvent présenter les réacteurs à combustible fluide, tels que les systèmes à boues d'oxyde ou à sel fondu, pour la surgénération par neutrons thermiques.

Cycle du combustible nucléaire

La fabrication du combustible nucléaire est l'une des techniques les plus importantes de l'énergie nucléaire; elle est en progrès constant grâce à diverses méthodes de traitement qui ont permis d'améliorer lentement mais régulièrement le comportement du combustible à des températures de marche de plus en plus élevées et avec un meilleur rendement thermique de chaque unité de combustible pendant toute sa durée.

Alors que le nombre de types distincts de réacteurs à l'étude s'est quelque peu réduit au cours des dernières années, il existe encore un grand choix de cycles de combustible. On utilise l'uranium métallique dans les systèmes à uranium naturel à faible irradiation. Pour les réacteurs refroidis à l'eau, le combustible qui a le mieux fait ses preuves et que l'on préfère est l'oxyde d'uranium. Les résultats communiqués à la Conférence indiquent qu'il conservera la faveur des utilisateurs pour les réacteurs de ce genre car il peut supporter des niveaux d'irradiation élevés. Un certain nombre de documents indiquent que les combustibles au carbure d'uranium semblent très prometteurs pour les réacteurs sans eau. On a également présenté des rapports sur d'autres composés, tels que les nitrures, sulfures, siliciures, etc.

L'acier inoxydable et les alliages au zirconium sont toujours les matériaux les plus utilisés pour le



Des dispositifs de télécommande au stand de la République fédérale d'Allemagne suscitent l'intérêt des visiteurs (Photo Nations Unies)

gainage, bien que les spécialistes soient toujours préoccupés par leur tendance à la fragilité à haute température sous irradiation. Les alliages de magnésium ont donné de bons résultats dans les réacteurs à basse température refroidis par un gaz. En ce qui concerne les applications futures, des particules de combustibles céramiques enrobées de carbone constituent un bon combustible pour les réacteurs à haute température refroidis par un gaz.

Au Canada, le combustible le plus utilisé est l'oxyde d'uranium naturel gainé de zirconium sous des irradiations évaluées à 10 MW-jours par kg d'uranium. En France, le combustible utilisé est l'uranium métal naturel sous gaine en alliage de magnésium, exposé à une irradiation d'environ 3,5 MW-jours par kg d'uranium. En URSS, les réacteurs à eau légère utilisent l'oxyde d'uranium enrichi sous gaine en alliages d'acier inoxydable et produiront plus de 20 MWj/kgU. A l'heure actuelle, au Royaume-Uni, on utilise l'uranium métal naturel sous gaine en alliage de magnésium, qui produit 4 à 5 MWj/kgU. Aux Etats-Unis, le combustible utilisé est en grande partie l'oxyde d'uranium sous gaine d'acier inoxydable ou de Zircaloy et on prévoit une irradiation de 16 à 25 MWj/kgU.

On procède également à l'étude d'un certain nombre de types de combustibles fluides tels qu'un sel fondu, le plutonium fondu et les boues aqueuses. Ces combustibles permettent d'espérer d'importantes réductions dans les prix de revient du cycle de combustible, mais leur emploi pose de énormes problèmes qu'il faut encore résoudre.

Compte tenu des progrès remarquables réalisés dans la fabrication de combustibles de longue durée et dans la réduction des prix de revient des diverses

opérations nécessaires pour entretenir le cycle de combustible, il semble actuellement que le meilleur temps d'irradiation du combustible, du point de vue économique, pour les réacteurs générateurs sera du même ordre que la durée de vie moyenne du combustible.

Plusieurs rapports ont été présentés sur la phase finale du cycle de combustible, c'est-à-dire le traitement chimique du combustible irradié. Il existe un certain nombre de méthodes rivales, mais à l'heure actuelle, c'est le procédé d'extraction par solvant aqueux qui est utilisé pour récupérer le combustible nucléaire. Toutefois, d'autres procédés, tel le traitement pyrométallurgique et pyrochimique, font de rapides progrès. En fin de compte, ce seront les types de combustibles à régénérer qui détermineront, dans une large mesure, le procédé le plus économique à utiliser.

Ainsi que l'on a mentionné les rapports, on peut maintenant prévoir le recyclage économique des combustibles de conversion : plutonium et uranium-233. Dans quelques années, on devrait faire la preuve du recyclage du plutonium dans les grands réacteurs de puissance exploités commercialement ; ce sera là un important progrès dans la voie de l'utilisation économique du cycle complet de combustible. Quelques années encore et l'on verra réaliser le recyclage de l'uranium-233.

Sécurité nucléaire et gestion des déchets

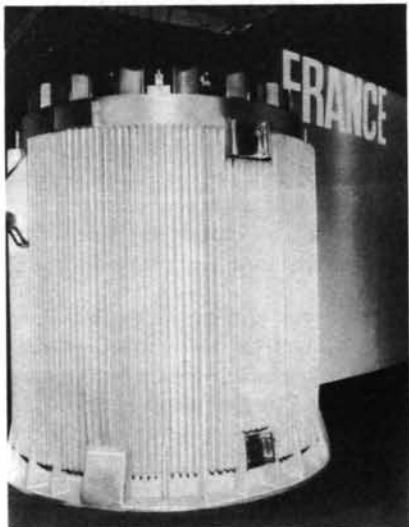
Les communications faites à la Conférence montrent qu'une conception générale de la sécurité qu'exigent ces filières se forme dans le monde entier. La recherche se fait dans deux directions complémentaires quoique distinctes et se place sous le signe de la prudence. Tout d'abord, pour prévenir les accidents, le réacteur est généralement conçu en surestimant largement les risques et l'on tient compte du comportement cinétique et neutronique du cœur, des caractéristiques des matériaux de construction, et l'ensemble est doté d'une surabondance d'appareils de mesure et de contrôle aussi sûrs que possible. En outre, les opérateurs reçoivent une formation très poussée et les règles détaillées d'exploitation de l'installation sont appliquées à la lettre. En second lieu, la plupart des réacteurs de puissance sont pourvus d'une série de dispositifs de sécurité et d'alarme tendant à limiter les conséquences d'un accident. Dans certains pays, on entoure même tout l'ensemble réacteur d'une structure protectrice étanche pouvant résister à de fortes pressions.

Toutes ces formules font l'objet de programmes complets de recherches, de mise au point et d'essais dans presque tous les pays qui s'intéressent aux réacteurs. Ces recherches portent donc sur une grande variété de sujets, depuis la cinétique des réacteurs jusqu'au comportement des produits de fis-

sion, y compris l'étude de matériaux, et font appel à diverses disciplines scientifiques et techniques; nul doute qu'elles contribueront, j'en suis sûr, à maintenir la sûreté d'exploitation de l'énergie nucléaire et qu'elles suivront l'évolution de cette industrie.

Le problème de la sécurité nucléaire n'est pas seulement une question de sûreté d'exploitation des réacteurs nucléaires. Il faut encore évacuer les déchets et les rendre inoffensifs. Des progrès considérables ont été réalisés depuis quelques années en Tchécoslovaquie, en France, en Inde et aux Etats-Unis en ce qui concerne la gestion des déchets radioactifs provenant des installations nucléaires et, notamment, des réacteurs de puissance. Dans le monde entier, un grand effort est fait pour activer la recherche et les études en matière de gestion des déchets afin de réduire encore davantage la quantité de matières radioactives évacuées dans le milieu ambiant.

Comme l'indiquent des communications provenant de France et des Etats-Unis, la gestion scrupuleuse des déchets radioactifs des centrales nucléaires ne gêne pas l'expansion et la multiplication des installations nucléaires, et l'évacuation de déchets au cours des dernières années ne s'est pas traduite par une augmentation anormale de la radioactivité ambiante. La concentration d'effluents radioactifs des centrales nucléaires avant toute dilution dans le milieu n'a pas dépassé 1 à 3 % du minimum admissible prescrit par les normes internationales de radioprotection.



Au stand de la France: container pour l'expédition des éléments combustibles du réacteur Pégase (Photo Nations Unies)

L'enfouissement de certains types de déchets solides et liquides de faible activité s'est révélé sans danger et ce mode d'élimination est pratiqué dans

beaucoup de pays, notamment au Canada, aux Etats-Unis et en URSS. Dans beaucoup de pays qui disposent de terrains propices, la multiplication des emplacements pour l'enfouissement et le stockage, dont l'utilisation est économique, permet de ne plus recourir essentiellement à l'évacuation dans la mer.

Depuis plus de quinze ans, dans le Royaume-Uni, aux Etats-Unis et en URSS, les déchets liquides de haute activité qui proviennent du recyclage du combustible sont stockés dans des réservoirs souterrains spéciaux et l'expérience a prouvé que ce stockage constitue une mesure provisoire sûre et pratique. Toutefois, il pose des problèmes pour plus tard à cause de la période extrêmement longue de ces déchets (plusieurs centaines d'années) et de la durée utile relativement courte des réservoirs utilisés quelques dizaines d'années seulement. Aussi, plusieurs pays mettent-ils au point des méthodes permettant de transformer les déchets liquides fortement radioactifs en solides stables.

Une fois que l'on a solidifié ces déchets, il faut encore trouver un lieu où les stocker définitivement. Des ouvrages construits par l'homme risquent de ne pas pouvoir conserver leur intégrité pendant les centaines d'années qui devront s'écouler avant que les déchets deviennent relativement inoffensifs; en revanche, les formations salines souterraines semblent offrir des emplacements privilégiés pour les déchets solides et les déchets liquides concentrés à cause de leurs caractéristiques géologiques exceptionnelles. En effet, ces formations salines sont sèches et imperméables; elles ont une bonne résistance structurelle et une bonne conductibilité thermique; elles ne se trouvent pas dans le voisinage de nappes phréatiques utilisables par l'homme et il en existe un peu partout dans le monde. Les recherches qui se poursuivent dans plusieurs pays sur ce problème seront suivies avec un vif intérêt.

Je suis convaincu qu'en continuant à veiller à la sûreté nucléaire et à prêter attention à la gestion des déchets, il est possible de tirer pleinement parti des ressources offertes par l'énergie d'origine nucléaire, tout en conservant - ou même en améliorant - les normes générales de santé et de sécurité publiques. L'utilisation accrue de cette forme d'énergie peut même contribuer à diminuer la pollution atmosphérique, laquelle est due en grande partie à l'emploi généralisé des combustibles fossiles.

Progrès réalisés dans la transformation de l'énergie

Les progrès signalés à la Conférence dans le domaine de la transformation de l'énergie - conversion nucléo-thermoélectrique et nucléo-thermoionique et conversion magnétohydrodynamique - ouvrent de nouvelles perspectives pour la production de courant électrique.

On a démontré peu après la dernière Conférence que la conversion directe de la chaleur produite par la fission nucléaire en énergie électrique, par émission thermoionique d'électrons, était réalisable. On peut apprécier les perspectives qu'ouvre cette découverte d'après l'ampleur des efforts signalés à la Conférence, qui sont déployés dans le Royaume-Uni, en URSS, en France et aux Etats-Unis pour la mettre au point. Les essais hors-pile de convertisseurs au carbure d'uranium ou munis d'émetteurs métalliques réfractaires ont montré que ces appareils avaient une durée utile de plusieurs milliers d'heures. Au cours d'essais en piles, des convertisseurs au carbure d'uranium ou à l'oxyde d'uranium ont fonctionné pendant plusieurs centaines d'heures. Naturellement, les possibilités offertes par ces dispositifs ont stimulé l'étude de matières nouvelles. Comme la technologie des métaux réfractaires permet maintenant d'atteindre des températures plus élevées dans les réacteurs, le rendement des appareils thermoioniques augmente, ce qui encourage de plus en plus à résoudre les nombreux problèmes en suspens.

L'étude de la production de courant électrique par les procédés magnétohydrodynamiques se poursuit dans de nombreux laboratoires. Là encore, les températures élevées que doit atteindre le plasma posent de sérieux problèmes de matériaux; l'emploi d'un fluide inerte en faciliterait la solution. Le convertisseur à cycle fermé couplé avec un réacteur nucléaire à haute température refroidi par un gaz semble intéressant. A ce sujet, on a signalé des projets ayant trait à des réacteurs fonctionnant dans la gamme de température de 1 800 à 2 200° C.

La production d'électricité, en transformant directement en courant la chaleur dégagée par la désintégration des radioisotopes, est une technologie qui s'est affirmée depuis la dernière Conférence. Elle fait ses preuves, non seulement dans les engins spatiaux, mais aussi dans plusieurs installations terrestres, notamment des stations météorologiques, des balises maritimes et des phares. Une station météorologique américaine embarquée, alimentée par une génératrice au strontium-90 de 60 watts, est en service dans le golfe du Mexique. Des stations météorologiques automatiques actionnées par des génératrices de 5 watts au cérium-144 fonctionnent parfaitement dans une région du centre de l'URSS.

On a démontré qu'il était possible de transformer directement la chaleur dégagée par la fission en courant électrique. Les travaux entrepris en Union soviétique qui ont abouti au réacteur "Romachka" présentent un grand intérêt. Ce réacteur à neutrons rapides au bicarbure d'uranium (UC₂) chauffe des thermocouples au silicone-germanium; il fonctionne à une température d'environ 1 800° C et à une puissance de plusieurs centaines de watts électriques depuis le milieu du mois d'août.



Présentation de vêtements de protection au stand de la Suède (Photo Nations Unies)

Les Etats-Unis espèrent démontrer au printemps 1965 la viabilité du vol orbital d'un réacteur (SNAP 10A) de 500 watts, fonctionnant selon le principe de la conversion thermoélectrique. Il s'agit d'un réacteur à uranium-235 ralenti par un hydrure de zirconium et refroidi par un métal liquide; il pèsera moins de 450 kg, y compris le blindage indispensable. Ces réacteurs construits sur une plus grande échelle permettront aux futurs satellites de télécommunication de diffuser simultanément sur plusieurs canaux de télévision des émissions que les récepteurs privés pourront capter en direct.

Il est clair que les réacteurs SNAP et Romachka, dont la construction obéit aux besoins énergétiques des engins spatiaux, pourront trouver des applications tout aussi importantes à terre, car ils ont l'avantage d'être à la fois peu encombrants et sûrs.

Autres applications

Nous avons entendu parler des études en cours aux Etats-Unis, en Israël et en Tunisie pour appliquer l'énergie atomique à la fois à la production de courant électrique et au dessalement de l'eau. L'URSS et la France ont présenté des données intéressantes sur des réacteurs utilisables pour des applications industrielles telles que le dessalement. Tous ces

travaux sont très encourageants et l'on peut espérer qu'une ou plusieurs installations à double fin - produisant de l'électricité et des dizaines de milliers de mètres cubes d'eau douce par jour - seront construites et fonctionneront d'ici quatre ou huit ans.

D'après les études entreprises jusqu'à présent, il est probable que les installations nucléaires à double fin des prochaines décennies pourront produire de l'eau douce et du courant électrique à des prix assez bas pour être mises au service des agglomérations urbaines et de l'industrie dans le monde entier. L'eau ainsi produite pourrait même, dans des cas précis, présenter un intérêt économique en agriculture, par rapport à d'autres solutions.

Une autre application immédiate des réacteurs nucléaires est de produire du courant et de la chaleur dans des secteurs isolés. Nous avons entendu une communication de l'Union soviétique sur l'installation préfabriquée ARBUS, de 750 kW_e, dont le réacteur est refroidi et modéré par une substance organique. Cette centrale, qui a été mise en service pendant l'été 1963, a son circuit primaire, ses pompes et ses appareils auxiliaires en acier ordinaire (fournis à bas prix par l'industrie pétrolière) et tient dans 19 cadres ne dépassant pas 20 tonnes chacun. Les spécialistes soviétiques ont également présenté TES-3, installation à eau sous pression de 1 500 kW_e, montée sur quatre grands véhicules à chenilles. De leur côté, les spécialistes des Etats-Unis ont décrit des réacteurs transportables à eau sous pression, dotés de coeurs compacts constitués par des cermet d'acier inoxydable et d'oxyde d'uranium; ils ont donné des renseignements sur l'exploitation de ces réacteurs à plusieurs emplacements, aux Etats-Unis, dans l'Arctique et dans l'Antarctique. Le succès de ces installations capables d'atteindre une puissance de 2 000 kW_e tout en fournissant une quantité appréciable de chaleur pour le chauffage, permet de mettre à la disposition des utilisateurs une formule de centrale nucléaire de petites dimensions répondant aux besoins de secteurs isolés, qu'il s'agisse d'une installation minière, de missions scientifiques ou autres usagers.

Les espoirs que l'application de l'énergie d'origine nucléaire à la propulsion des navires avait éveillés à la Conférence de 1958, se trouvent maintenant confirmés par l'expérience acquise dans l'exploitation de deux navires nucléaires. Depuis son lancement, il y a cinq ans, le brise-glace Lénine a amplement démontré les avantages que l'énergie d'origine nucléaire pouvait offrir pour ce service important. Le N.S. Savannah, qui est sur le point d'achever sa deuxième croisière européenne, donne également entière satisfaction.

Deux pays, la République fédérale d'Allemagne et le Japon, ont déjà élaboré des projets définitifs

pour la mise en chantier de leurs premiers navires nucléaires. D'autres poursuivent des études préparatoires pour des projets futurs, et l'Union soviétique a annoncé à la Conférence qu'elle espérait construire deux nouveaux brise-glace nucléaires dont le premier entrerait en service en 1971.

Le programme Plowshare des Etats-Unis, qui vise à étudier les applications pacifiques des explosifs nucléaires, a suscité un vif intérêt. Malgré le fait que ce programme n'a pas encore dépassé son stade initial et qu'il faut encore réunir de nombreuses données avant d'entreprendre des travaux utiles, il semble que le recours aux explosions nucléaires ouvre des perspectives riches en promesses pour les travaux du génie civil, l'industrie minière, l'extraction de gaz naturel et du pétrole et la recherche. Les délégués de plusieurs pays ont fait des suggestions intéressantes concernant les formes de collaboration et de participation sur le plan international. On espère que grâce à l'appui et à la coopération des divers pays, la technologie des armes nucléaires pourra être mise au service de la recherche et du génie civil pour le bien de l'humanité.

Recherche et réacteurs à haut flux

Il ressort des mémoires présentés à la Conférence que les applications des réacteurs de recherche de construction récente peuvent se classer en trois catégories principales : 1) examen continu des effets des rayonnements sur les matériaux employés pour la construction de réacteurs et pour la fabrication de ralentisseurs et de combustibles; 2) études de physique d'un caractère plus fondamental et nécessitant un contrôle plus rigoureux, rendues possibles grâce aux réacteurs spécialement conçus pour des fins précises : un exemple typique est fourni par les travaux exécutés à l'aide de réacteurs à neutrons pulsés; 3) production de radioisotopes à des fins thérapeutiques, pour les travaux de recherche à l'aide de radioindicateurs, et, depuis peu aux Etats-Unis et en Union soviétique, pour la préparation de quantités relativement importantes d'éléments transplutoniens.

Je me laisse peut-être guider par mes préférences personnelles en affirmant que la perspective de pouvoir faire des recherches fondamentales et appliquées avec quelques grammes d'isotopes du californium, quelques centaines de milligrammes de berkelium, quelques milligrammes d'einsteinium, voire un milligramme de fermium produits dans ces réacteurs est une des plus passionnantes que nous connaissions depuis des dizaines d'années.

Le remplacement progressif des réacteurs de recherche universels par des filières spécialisées devient particulièrement évident lorsqu'on examine la construction de réacteurs à haut flux destinés aux

essais de matériaux ou à la production de radioisotopes. Les réacteurs ci-après fonctionnent déjà ou doivent entrer en service prochainement : HFIR, HFBR et ATR aux Etats-Unis ; MP, MPR et SM-2 en Union soviétique ; PEGASE en France.

Le désir de disposer de flux intenses de neutrons a stimulé les études technologiques qui parfois sont allées au-delà des conditions régnant dans les réacteurs de puissance actuellement utilisés, ce qui a ouvert la voie vers de nouveaux perfectionnements dont les génératrices nucléaires pourront également bénéficier. Parmi les principaux progrès, il convient de citer la mise au point d'éléments combustibles et de coeurs permettant d'obtenir des puissances spécifiques et des flux thermiques très élevés.

Nous avons également appris à adapter le flux aux exigences expérimentales, et l'expérience acquise dans le passé nous permet de comprendre à quel point il importe de tenir soigneusement compte des besoins de la recherche lors de l'étude et de la construction du réacteur. Grâce aux nouvelles connaissances, il a été possible de réaliser de remarquables installations expérimentales telles que les boucles d'essai des éléments combustibles dont sont munis le réacteur MR en Union soviétique et le réacteur PEGASE en France, la boucle à haute température refroidie par un gaz du réacteur PLUTO au Royaume-Uni, dispositif de refroidissement à hydrogène liquide du réacteur français à flux intense et la chambre de ralentissement à hydrogène liquide du réacteur DIDO au Royaume-Uni.

Radioisotopes

Il ne fait aucun doute que les techniques radioisotopiques ont maintenant pénétré dans tous les domaines de la science et du génie civil. Il s'agit, en effet, d'une réalisation de l'âge atomique qui peut être appliquée dans tous les pays quel que soit leur degré de développement technologique.

J'estime que parmi les grands succès techniques de ces dernières années il faut compter la possibilité - mentionnée dans plusieurs mémoires présentés à la Conférence - de produire, de séparer et de purifier des radioisotopes en quantités suffisantes pour pouvoir envisager leur utilisation comme source d'énergie thermique ou de rayonnement. Plusieurs pays ont fait connaître des progrès importants dans ce domaine. Un autre domaine qui a connu des réalisations remarquables est l'emploi des radioisotopes en médecine ; c'est ce que j'appellerai les "applications humanitaires de l'atome".

Du point de vue scientifique, la pratique généralisée de l'analyse par activation neutronique comme méthode de mesure courante de presque tous les éléments de la table périodique utilisés comme radio-indicateurs est d'un très grand intérêt pour la médecine,

l'agriculture et les sciences physiques. En fait, elle a même trouvé des applications en matière pénale.

Les rayonnements ionisants, qu'ils soient produits par des radioisotopes, des appareils ou des réacteurs, servent désormais au traitement de composés organiques, de matières plastiques et autres matériaux, à la stérilisation des instruments médicaux et à la conservation des aliments.

Réactions thermonucléaires contrôlées

La Conférence de 1958 avait été marquée par la révélation de données sur les réactions thermonucléaires contrôlées, que l'on avait gardées secrètes jusque là. Les années 1958 et 1959 furent une époque de balbutiements dans ce domaine d'étude passionnant qui pourrait permettre un jour de transformer les océans en une source inépuisable d'énergie. Les mémoires présentés à la Conférence de 1964 montrent que depuis lors nos connaissances se sont considérablement enrichies. Les physiciens du plasma se rendent désormais parfaitement compte de la difficulté des problèmes scientifiques et techniques qu'il faudra résoudre pour suspendre, comprimer et maintenir dans l'espace des gaz ayant des températures de l'ordre de celles qui règnent dans les étoiles. Ils savent qu'ils n'ont guère de chances de trouver rapidement un procédé technique simple pour contrôler la fusion. Ils ont établi, pour leur propre compte et pour celui des autres spécialistes de la science nucléaire, que la fusion contrôlée pose un des problèmes scientifiques et techniques les plus difficiles que l'on ait jamais abordés.

Le fait que l'expérience de ces six dernières années a fortement tempéré l'optimisme initial ne devrait pas nous empêcher d'apprécier les progrès déjà réalisés à leur juste valeur. La physique des plasmas est devenue une nouvelle branche importante et passionnante des sciences fondamentales. Je tiens à mentionner trois faits, qui, parmi beaucoup d'autres, témoignent de l'évolution de la physique des plasmas. Tout d'abord nous constatons le perfectionnement croissant des méthodes employées, dont un aspect est l'apparition d'une terminologie nouvelle que les autres spécialistes de la science nucléaire ne parviennent déjà plus à comprendre. Puis, il y a l'ampleur des activités qui se traduit par un accroissement général du nombre des scientifiques s'occupant de fusion contrôlée, par l'augmentation des sommes que les gouvernements investissent dans les installations scientifiques et par la multiplication des études publiées. Le nombre des articles scientifiques consacrés chaque année à la physique des plasmas a augmenté d'environ 45 % depuis 1959, et celui des chercheurs travaillant dans ce domaine s'est accru dans la même proportion. Quant aux grandes installations expérimentales affectées à ces travaux, on en dénombre 10 en Union soviétique, 14 au Royaume-Uni et en Europe occidentale et 4 au Japon et en Australie.

Cependant, cette évolution se concrétise principalement par les résultats scientifiques de ces dernières années, dont témoignent les mémoires présentés à la Conférence. Alors qu'en 1958 les spécialistes du plasma commençaient seulement à provoquer des réactions de fusion, en les identifiant par les neutrons thermiques émis au cours de ces réactions, plusieurs laboratoires produisent maintenant régulièrement des plasmas dont les ions possèdent des énergies supérieures à ce qu'il est convenu d'appeler la température d'allumage minimum.

Pour obtenir des réactions de fusion contrôlée d'un intérêt pratique, il faudrait réaliser des réactions nucléaires d'une durée suffisante, des températures très élevées et des plasmas de forte densité. A l'heure actuelle il existe bien des appareils qui permettent soit d'approcher la température voulue, soit d'entretenir des réactions nucléaires pendant la durée nécessaire, soit d'obtenir un plasma de la densité requise, mais aucun n'est capable d'assurer simultanément ces trois conditions. Il faut maintenant - et c'est là un objectif à longue échéance - construire un dispositif qui permettrait de produire des réactions en combinant tous ces facteurs de façon satisfaisante.

Le problème le plus important qui se pose en matière de fusion contrôlée - celui de la stabilité des plasmas - s'appuie désormais sur une base scientifique solide. On ne peut qu'admirer les travaux d'avant-garde que Yoffe a exécutés en Union soviétique

sur le confinement du plasma dans une région où la pression du champ magnétique est réduite à un minimum, appelé "confinement minimum B". Il est également encourageant d'apprendre que de nombreuses autres expériences sont en cours pour mesurer les limites de la stabilité des plasmas dans des conditions diverses, telles que les expériences NTSE au Royaume-Uni, DECA en France et DC-2 aux Etats-Unis.

Les moyens actuels permettent de prévoir le comportement des plasmas avec une précision croissante. Dans nombre de cas, on est parvenu à faire concorder parfaitement les données expérimentales et théoriques, notamment lors des expériences exécutées dans le cadre du programme Phoenix au Royaume-Uni et dans celui des programmes Levritron et ALICE aux Etats-Unis. Ces concordances qu'aucun laboratoire n'aurait pu réaliser en 1958, indiquent nettement que la science des plasmas évolue progressivement vers la maturité.

Nous ne pouvons pas être absolument certains qu'il soit possible de produire de l'énergie à l'aide de réactions thermonucléaires contrôlées, mais selon l'opinion généralement admise à la Conférence, on y parviendra un jour, peut-être même avant la fin du siècle. On ne saurait, certes, sous-estimer les bienfaits qui en résulteraient, dont le plus important serait de mettre une source inépuisable d'énergie à la disposition de toute l'humanité.