

les progrès de la fusion contrôlée

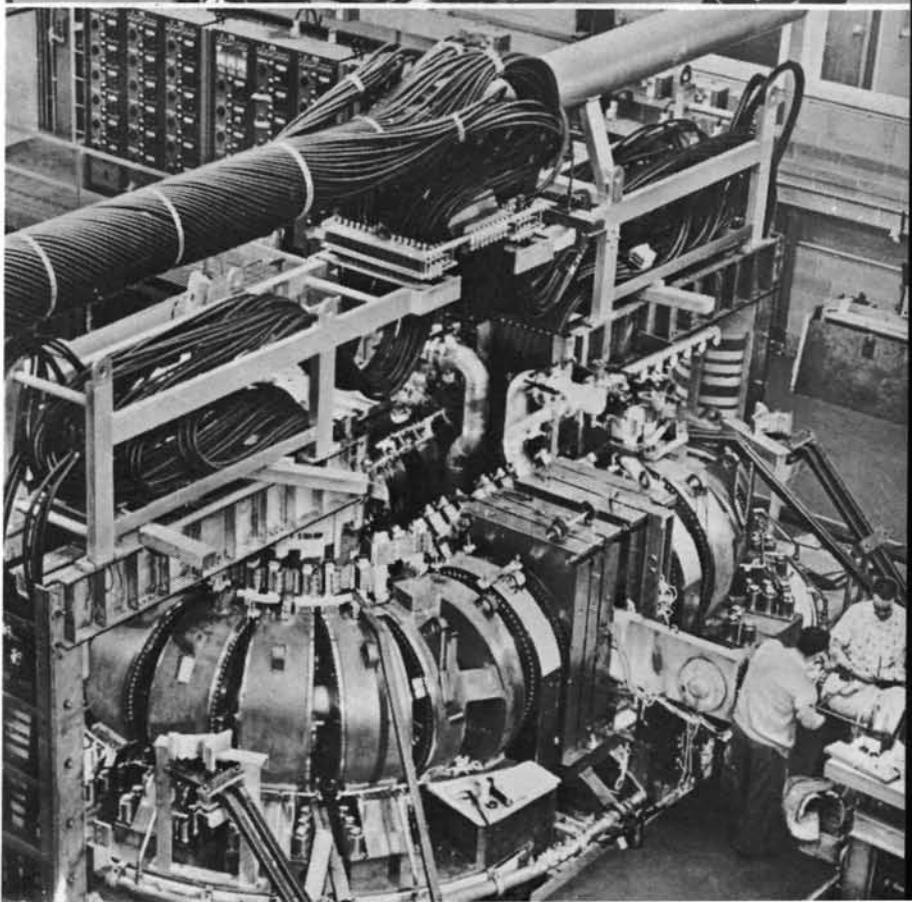
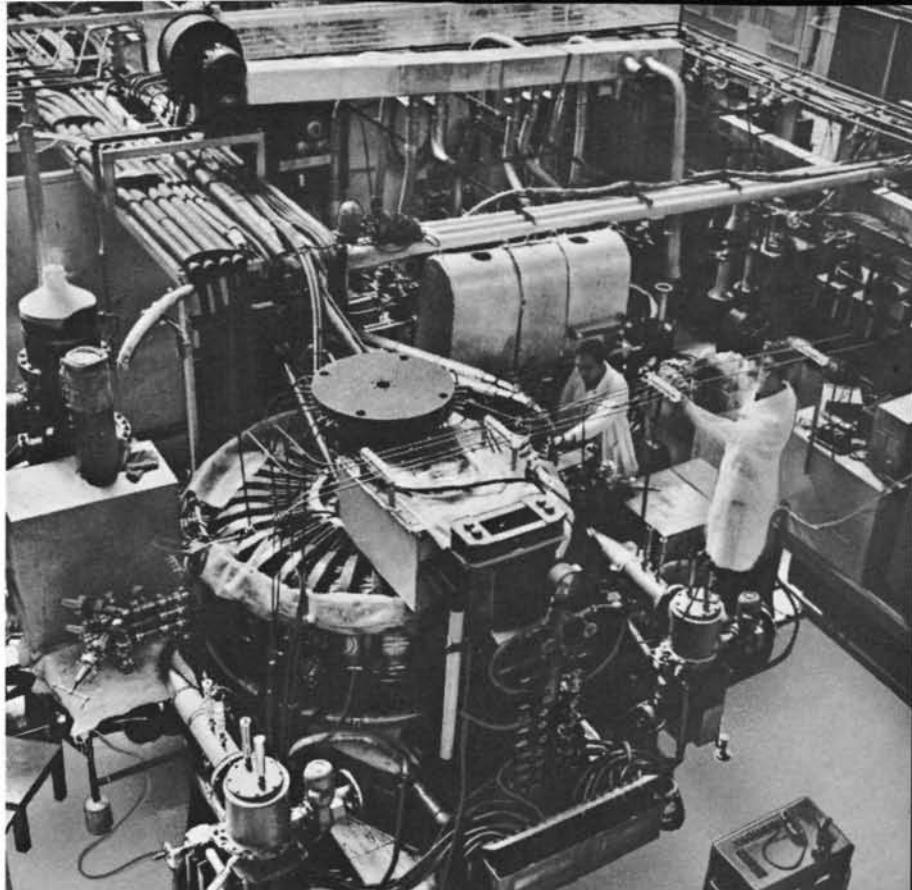
La recherche sur la fusion thermonucléaire contrôlée vise à domestiquer des ressources d'énergie pratiquement illimitées.

Le rapport d'un groupe d'experts réuni par l'AIEA à Trieste au mois de juin montre que l'on a bon espoir de résoudre certains des problèmes pratiques qui se posent encore.

Les trois membres du personnel de l'Agence qui ont organisé la réunion et les 11 membres du groupe d'étude qui y ont assisté n'ignoraient pas certains faits que l'on doit considérer comme inéluctables. La rapide croissance démographique dans le monde et l'amélioration du niveau de vie créent une demande de plus en plus forte d'énergie. Or, les ressources actuelles ont des limites que l'on peut calculer et qui sont loin d'être inépuisables.

La plus importante des sources non nucléaires d'énergie est constituée par les combustibles dits fossiles — houille, hydrocarbures, etc. — dont les réserves totales sont évaluées à environ 100 Q (Q est une unité arbitraire qui vaut 3×10^{14} kWh ou 10^{21} joules). Dans l'état actuel de la demande, ces ressources à elles seules seraient suffisantes pour satisfaire les besoins jusqu'à l'an 2050, mais on a la certitude que cette demande augmentera. L'industrie chimique à elle seule exige des quantités croissantes d'hydrocarbures, ne serait-ce que pour la fabrication des matières plastiques. D'autre part, la combustion du combustible fossile a pour conséquence bien connue un dégagement d'anhydride carbonique et d'autres résidus qui polluent l'atmosphère. D'autres sources d'énergie, comme le soleil (fours ou cellules solaires) la houille blanche, les vents et les marées ne semblent guère de nature à contribuer d'une manière significative à satisfaire la demande.

TOKAMAK-3
est l'un des appareils avec
lesquels les spécialistes
soviétiques ont
obtenu des résultats
prometteurs
dans la recherche
sur la fusion
contrôlée. Photo: URSS



Un des premiers
modèles de la machine
«Stellarator»,
utilisée pour la
recherche sur
la physique des
plasmas au Laboratoire
de physique des
plasmas de Princeton.
Photo:
Princeton University

C'est pourquoi le développement de l'énergie d'origine nucléaire est indispensable. On fait déjà appel à la fission nucléaire: à la fin de 1969, il y avait 91 réacteurs de puissance en exploitation dans 14 pays, soit une capacité totale de production d'électricité de 15 500 mégawatts; on a calculé qu'en 1980, la capacité nucléaire installée atteindra environ 330 000 mégawatts et représentera environ 15% de la quantité totale d'électricité produite.

Les réserves de minerais d'uranium et de thorium à forte teneur sont évaluées à environ 100 Q; mais on peut aussi exploiter des gisements à faible teneur si la rentabilité est suffisante.

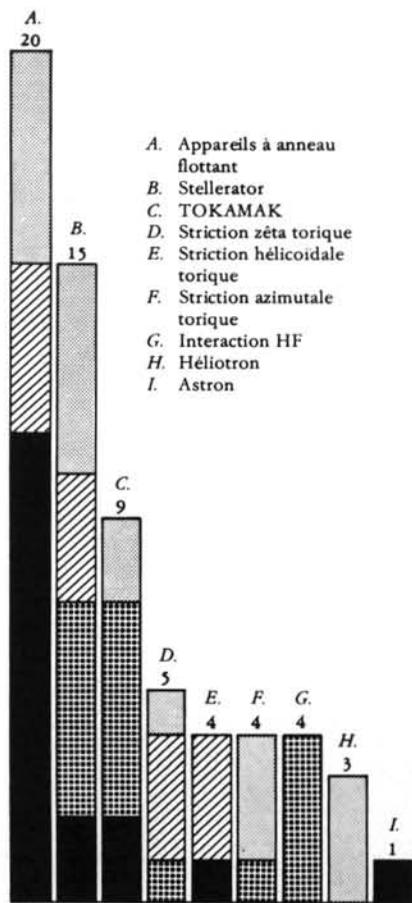
En revanche, la fusion nucléaire, d'après les communications présentées au Groupe d'étude, pourrait être une source d'énergie pratiquement inépuisable. Les centrales nucléaires à fusion telles qu'on les conçoit pourraient fonctionner avec du deutérium et du tritium, en utilisant du lithium dans un cycle de régénération du tritium. On pense que les ressources de substances riches en lithium seront plus que suffisantes pendant les premières décennies de l'ère des réacteurs à fusion et le Groupe a estimé que si l'on parvient à utiliser le lithium contenu dans la mer et dans des minerais à faible teneur, on disposera de 10 millions de Q supplémentaires.

Les experts qui ont participé à la réunion espèrent que, bien avant que l'on ait épuisé les ressources des minerais de lithium à haute teneur, la réaction de fusion deutérium-deutérium sera devenue réalisable; dans ce cas, les ressources d'énergie pourraient être considérées comme virtuellement illimitées; on les évalue à environ 10^{10} Q.

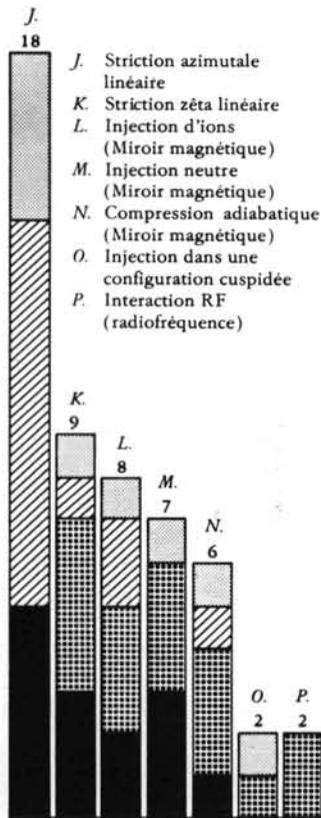
Des études ont permis de déterminer les conditions essentielles que doit remplir un véritable réacteur à fusion. Tout d'abord, on doit créer du plasma et le maintenir à une température de 50 à 500 millions de degrés C. Deuxièmement, ce plasma doit être confiné pendant un temps assez long pour satisfaire ce que l'on appelle le «critère de Lawson»: le produit de la densité du plasma par le temps de confinement doit dépasser une valeur d'environ 10^{14} ions-secondes par cm^3 . Des chercheurs soviétiques (avec une machine du type «TOKAMAK») et américains (avec une machine du type «SCYLLA») ont déjà atteint des valeurs qui se situent entre 3 et 6×10^{11} et sont par conséquent de deux ou trois ordres de grandeur inférieurs à celui que l'on s'efforce d'obtenir. Néanmoins, certains considèrent que la première machine de vraiment grandes dimensions que l'on construit pourrait montrer la factibilité du procédé.

On comprend de mieux en mieux, du point de vue théorique et du point de vue expérimental, les problèmes qui continuent de se poser et les moyens de les résoudre. Mais il reste encore beaucoup à faire.

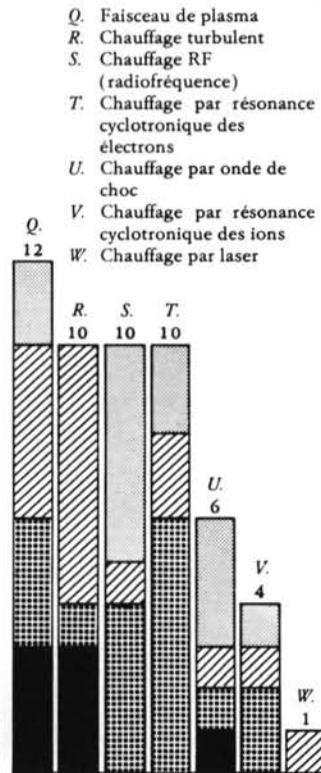
Les recherches en vue de trouver le moyen de confiner du plasma extrêmement chaud se poursuivent dans plusieurs directions et c'est l'utilisation de champs magnétiques très puissants qui semble être la plus prometteuse. Il y a deux catégories de machines à confinement magnétique selon que la configuration est fermée ou ouverte. Dans la première catégorie, le plasma est confiné à l'intérieur d'un espace en forme d'anneau par un champ magnétique; dans la deuxième catégorie on lui fait subir une «striction» mais il peut s'échapper par les deux extrémités de l'espace de confinement à moins que l'on ne prenne des mesures pour l'en empêcher. Les machines du type TOKAMAK sont de la première catégorie et les machines du type SCYLLA appartiennent à la deuxième.



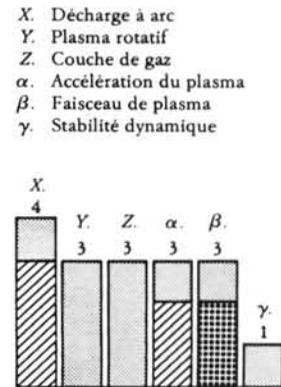
CONFIGURATIONS FERMEES



CONFIGURATIONS OUVERTES



MODE DE CHAUFFAGE



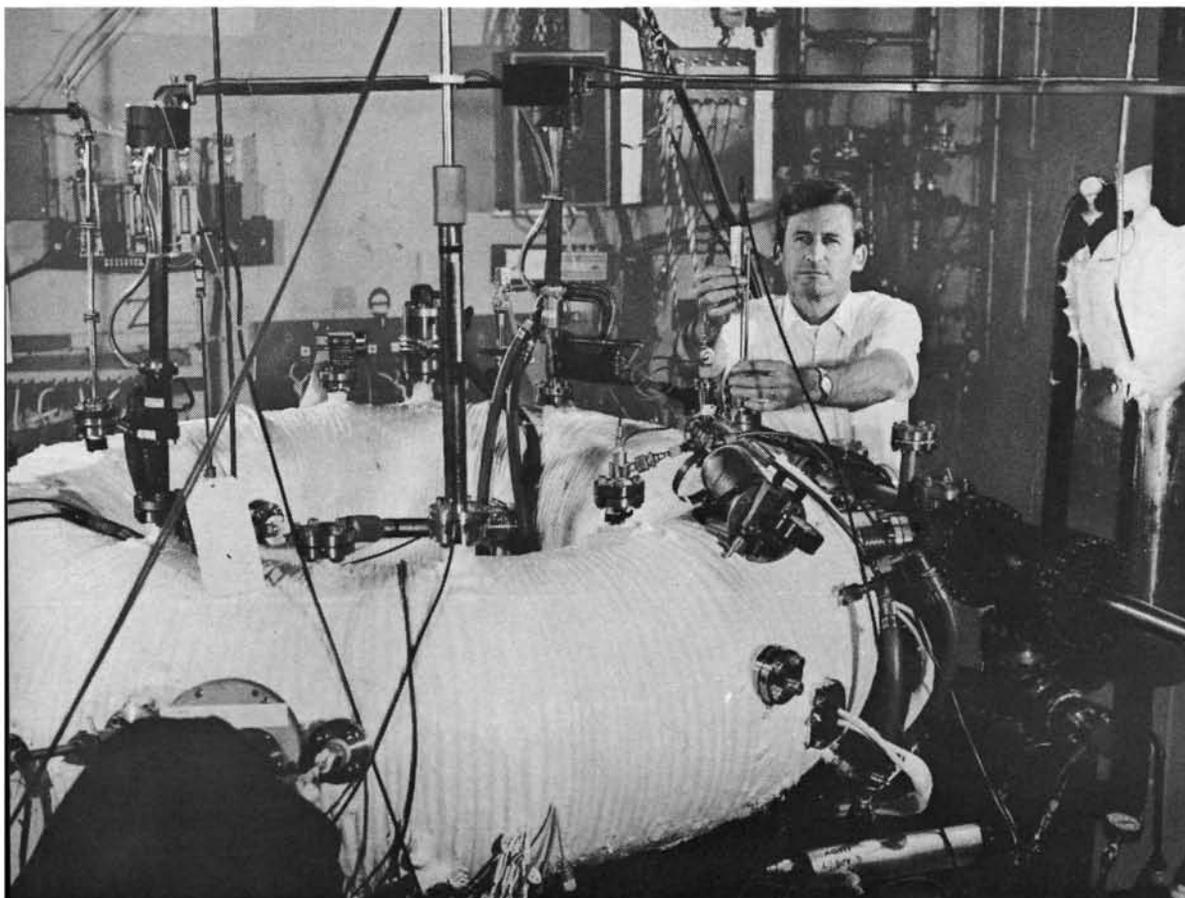
DIVERS



Le Groupe d'étude a considéré que les résultats obtenus avec des machines TOKAMAK sont «les plus favorables auxquels on ait abouti jusqu'ici avec le cycle fermé» et qu'«il est possible que cette machine fournisse un des moyens éventuels de réaliser un réacteur à fusion». Les problèmes importants qui restent à résoudre portent sur les points suivants: preuve de la validité des lois adoptées pour l'extrapolation des formules à l'échelle de machines de plus grandes dimensions, notamment si l'on augmente la température et la densité du plasma; le chauffage du plasma à des températures thermonucléaires; la connaissance des interactions du plasma et des parois de la chambre de confinement.

D'autres machines à cycle fermé ont reçu des noms dignes de la science-fiction: le Stellarator, le Torsatron, l'Héliotron hélicoidal, le Bumpy Torus, etc. Les noms de certains systèmes ouverts sont également pittoresques: Scylla, machine à striction azimutale, Pharon, Chalice, l'anneau Zeta, le Mégatron, etc. Des réacteurs à configuration magnétique ouverte peuvent présenter des avantages parce qu'il est plus facile d'injecter le plasma et d'extraire les produits de la réaction, et que l'on peut construire des unités de plus petites dimensions (des études théoriques montrent qu'un réacteur à fusion à cycle ouvert pourrait fonctionner à une puissance d'environ 1000 MW(e)); mais la difficulté de confiner le plasma semble plus grande. Une de ces machines, dite à striction azimutale linéaire, a déjà produit des plasmas ayant de bonnes

Le Levitron, de forme torique, est un des appareils utilisés pour l'étude des propriétés du plasma dans le cadre des études entreprises dans le monde entier pour déterminer s'il est possible de réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée. Photo: USAEC, San Francisco, Bureau de l'exploitation



caractéristiques et ne présentant pas d'instabilité; mais les fuites aux extrémités sont telles que l'on ne pourra, semble-t-il, obtenir une production positive d'énergie qu'avec un appareil de plusieurs kilomètres de long et d'une puissance d'environ 100 000 mégawatts. On peut citer ici un passage du rapport du groupe d'étude: «D'après plusieurs auteurs, on est en droit d'espérer que la construction d'un tel réacteur ne présentera peut-être pas de difficultés techniques insurmontables mais de l'avis général, il est difficile de justifier du point de vue économique la construction d'une centrale nucléaire de cette importance.» Néanmoins, les machines de ce type, même de petites dimensions permettent de mieux connaître le comportement du plasma à haute température.

Les activités de recherche actuelle sont relatées pays par pays dans une publication récente de l'Agence intitulée «World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion» (Etude mondiale des grandes installations de fusion contrôlée), supplément à la revue en langue anglaise «Nuclear Fusion». Quatorze pays procèdent à des recherches sur la fusion contrôlée et ont fourni des détails techniques, notamment les principes de fonctionnement, les caractéristiques essentielles, les principaux résultats et, parfois, une indication sur les plans pour l'avenir. Ces pays sont (les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'appareils cités): Australie (6), Tchécoslovaquie (3), Danemark (2), Etats-Unis (38), France (20), Italie (4), Japon (5), Pays-Bas (13), Pologne (2), République fédérale d'Allemagne (13), Royaume-Uni (11), Suède (5), Suisse (1), URSS (51). Un diagramme, reproduit ci-après, indique les directions dans lesquelles s'effectuent les recherches. [Page 3 de l'ouvrage cité.]

Il ne fait aucun doute que l'effort de recherche actuel ne portera pas ses fruits avant plusieurs années. On se heurte, en effet, à d'énormes difficultés théoriques et pratiques, mais on a des raisons de penser qu'on y parviendra. En particulier, il semble qu'il sera possible très prochainement d'atteindre les durées et les températures de confinement nécessaires pour maintenir une réaction thermonucléaire. Les appareils TOKAMAK actuels, lorsqu'on les aura construits à une plus grande échelle, pourront très probablement satisfaire le critère de Lawson. On considère que les obstacles scientifiques à la fusion contrôlée finiront par s'aplanir, tout au moins pour une des configurations actuellement à l'étude, dans les dix années qui viennent. Il sera alors possible de construire un appareil dans lequel l'énergie thermonucléaire libérée dans un mélange de deutérium et de tritium représentera une fraction appréciable de l'énergie fournie.

Un tel appareil constituerait une étape intermédiaire vers la construction d'un prototype produisant plus d'énergie qu'il n'en consomme et grâce auquel on pourrait étudier les problèmes pratiques qui resteraient à résoudre. Il est extrêmement difficile d'évaluer la durée, et plus encore les coûts, de ces travaux.

L'énergie de fusion est séduisante à plus d'un titre. Tout d'abord, comme on l'a dit, elle permet d'exploiter des ressources de combustible virtuellement illimitées. Ensuite, un réacteur à fusion n'est pas sujet à des excursions nucléaires ou à des emballements. En troisième lieu, les difficultés provoquées par les produits de fission disparaissent ainsi que les déchets radioactifs qui existent même dans les filières de réacteurs à fission les plus perfectionnées. Le seul problème pourrait être celui du stockage et de la manutention en toute sécurité du stock de tritium de la centrale à fusion, mais il n'est pas insurmontable. La radioactivité due à l'irradiation par les neutrons de la structure des réacteurs

à fusion sera sans doute comparable à celle des réacteurs à fission. Enfin, le combustible d'une centrale nucléaire à fusion ne pourra pas être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires, tout au moins dans l'état actuel de nos connaissances. Il serait techniquement possible d'employer des neutrons excédentaires pour une réaction de fission permettant de produire du plutonium à partir d'une couche fertile d'uranium, d'après le même principe que le réacteur surgénérateur à neutrons rapides; mais cela augmenterait considérablement la complexité technologique de la centrale à fusion et ne pourrait guère échapper à l'attention. L'utilisation de réacteurs de puissance à fusion pourrait donc faciliter l'application des garanties.

Les participants à la réunion du Groupe d'étude étaient venus des pays suivants: Australie, Etats-Unis, France, Italie, Japon, Pays-Bas, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni, Suède et URSS. Le rapport sera publié prochainement sous le titre «La coopération internationale dans la recherche sur la fusion contrôlée et ses applications».