

où en est la fusion?

A la fin de juin, plus de 500 scientifiques envoyés par 24 pays et 3 organisations internationales se sont réunis à Madison (Wisconsin) à l'occasion de la Quatrième conférence sur la physique des plasmas et la recherche concernant la fusion nucléaire contrôlée.

Au cours des cinq jours qu'a duré cette conférence, 141 mémoires ont été présentés, dont 49 par leurs auteurs et 92 par 31 rapporteurs ; ces exposés n'ont rien révélé de sensationnel mais, comme l'a dit le secrétaire scientifique de la conférence, ils indiquaient un progrès constant dans la production, le confinement et le chauffage du plasma à haute température.

L'objet de la recherche dans le domaine qui nous occupe est de démontrer finalement la possibilité de construire un réacteur à fusion, c'est-à-dire, un dispositif thermonucléaire capable de dégager plus d'énergie par l'intermédiaire d'une réaction de fusion nucléaire contrôlée qu'il n'en consomme pour confiner le plasma. Sur le temps qui passera encore avant que ce but soit atteint, les opinions sont très divergentes et il est peut-être préférable de n'avancer aucun chiffre; cela n'empêche pas que les participants à cette conférence ont fait preuve d'un certain optimisme, quoique prudent.

Trois exposés de synthèse ont été faits, par M. T.K. Fowler (Etats-Unis) sur les considérations théoriques, par M. R. J. Bickerton (Royaume-Uni) sur les expériences, et par M. H. K. Forsen (Etats-Unis) sur les systèmes de réacteurs possibles. M. Fowler a notamment déclaré: «Pour résumer mes impressions sur cette conférence, je dirai que le plus important est peut-être qu'elle a été la première conférence de l'AIEA sur la fusion à consacrer une séance entière aux systèmes de réacteurs à fusion. Peut-être se souviendra-t-on de cette conférence comme étant celle où l'on a lié la question du confinement des plasmas à celle des réacteurs à fusion.

«Ces deux problèmes sont restés bien souvent étrangers l'un à l'autre, mais il n'en sera désormais plus ainsi, car nous avons activement contribué à les rapprocher. Souvenez-vous seulement du nombre d'expériences nouvelles dont on nous a parlé ici et qui vont permettre d'atteindre les hautes températures et les fortes densités qui sont le véritable problème ... La théorie en est au point où des questions critiques se posent, auxquelles ces expériences pourront précisément

répondre ... Même si les premières réponses peuvent sembler décourageantes, je suis convaincu que nous serons bientôt sur la voie qui aboutira à la construction du premier réacteur à fusion.»

D'une façon très générale, deux conditions essentielles doivent être réunies pour envisager la réalisation d'un véritable réacteur à fusion. Premièrement, il faut constituer un plasma et le maintenir à des températures comprises entre 50 et 500 millions de degrés Kelvin. Deuxièmement, ce plasma doit être confiné suffisamment longtemps pour répondre à ce que l'on appelle le «critère de Lawson», c'est-à-dire, que le produit de la densité du plasma et du temps de confinement doit être supérieur à environ 10^{14} ions-seconde par cm^3 . Le confinement du plasma extrêmement chaud se fait généralement par des champs magnétiques dans deux sortes de configurations l'une fermée, l'autre ouverte. Dans la première, le plasma est en général retenu dans un volume de forme annulaire qui ne permet pas sa fuite le long des lignes de force du champ; dans la seconde, le plasma est contraint dans une zone du champ magnétique, mais il peut s'échapper aux extrémités du volume de confinement si l'on ne prend pas de dispositions pour l'en empêcher.

Tokamaks et autres systèmes

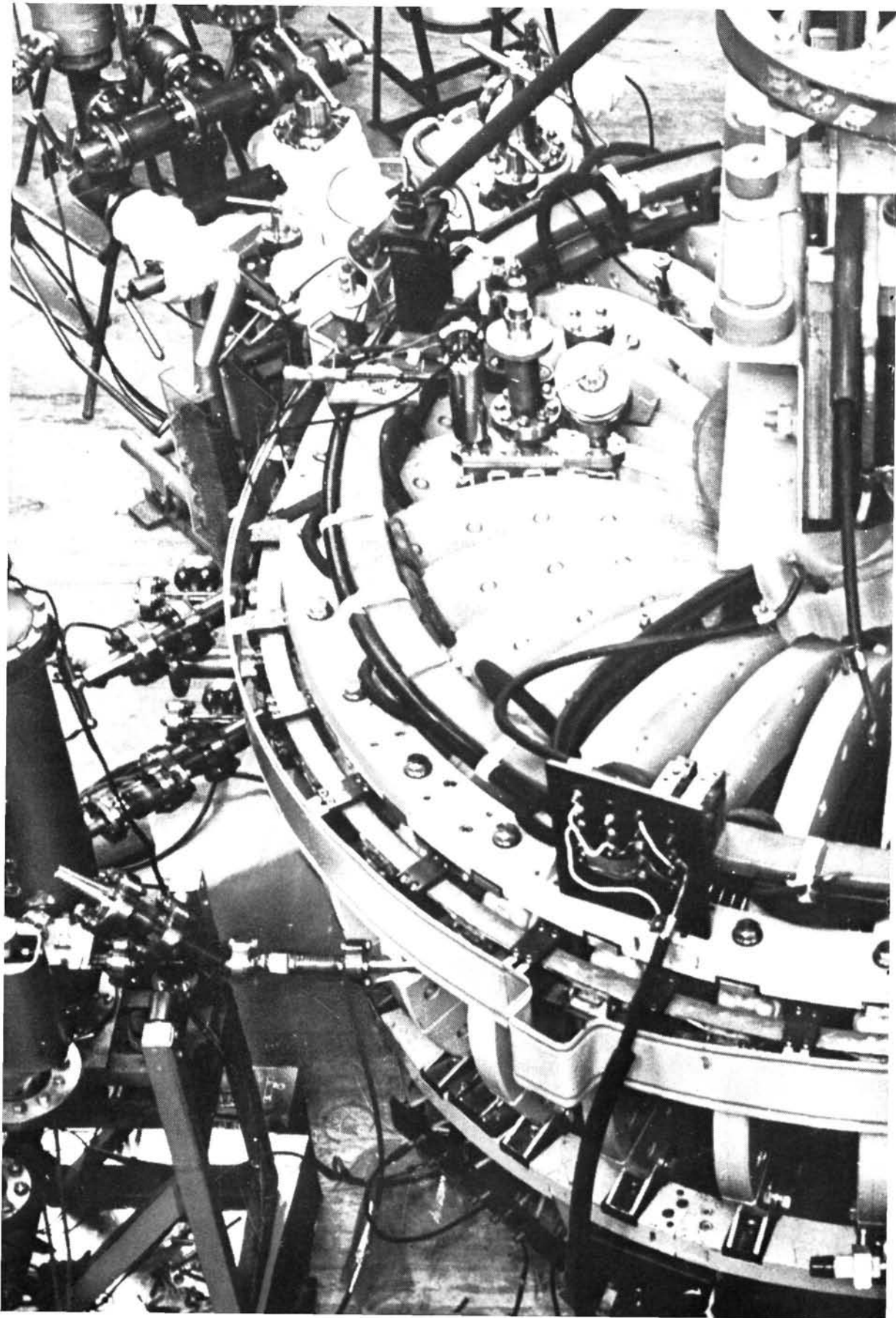
La plupart des mémoires présentés à la conférence traitaient des systèmes de confinement fermés. La théorie du confinement et du transport du plasma dans les géométries toriques est ardue et il n'existe aucune hypothèse qui puisse donner à elle seule une explication des résultats des expériences. En revanche, les théories relatives à des dispositifs particuliers ou à des régimes particuliers du plasma sont sans cesse affinées et l'on constate un rapprochement constant de la théorie et de l'expérience. Les mémoires indiquaient que les densités, les températures et les durées de confinement du plasma ont augmenté par rapport aux résultats communiqués lors de la précédente conférence sur le même sujet qui s'est tenue à Novosibirsk en 1968.

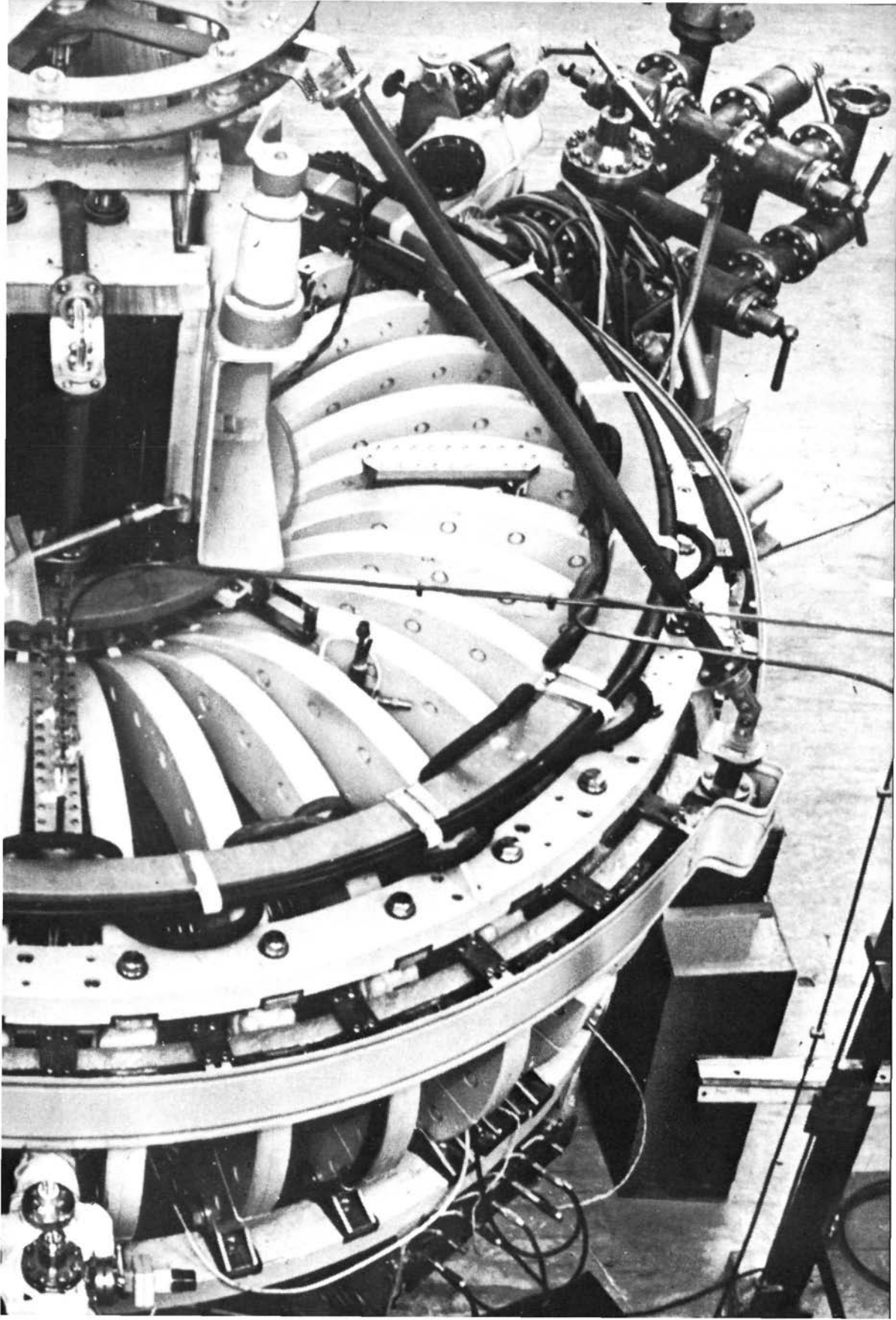
Quatre des configurations étudiées semblent être particulièrement intéressantes quant aux possibilités de réalisation d'un réacteur à fusion; parmi toutes ces machines, celles du type Tokamak viennent en tête. Ce sont des dispositifs pulsés dans lesquels le plasma de forme annulaire est confiné par un champ magnétique créé par un courant induit circulant autour de lui. Les résultats obtenus avec les grands Tokamaks utilisés à l'Institut Kourtchatov, en URSS, et à Princeton aux Etats-Unis sont analogues: densité de particules de $10^{14}/\text{cm}^3$, température des électrons atteignant 30×10^6 K, température des ions de 5 à 6×10^6 K et temps de confinement de 20 millisecondes, dans les conditions optimales. Un exposé tout à fait intéressant de MM. Kadomtsev et Chafranov (URSS) discutait la possibilité d'assurer le fonctionnement d'un Tokamak dans un état d'équilibre en utilisant les courants engendrés autour de l'anneau par l'interaction entre la diffusion radiale du plasma et le champ magnétique. Cette idée, récemment émise également par Bickerton et ses collaborateurs (Royaume-Uni), est considérée comme un progrès important de la théorie du Tokamak. Les trois autres systèmes de confinement fermés les plus activement étudiés sont 1) les dispositifs dans lesquels le plasma est retenu par une striction

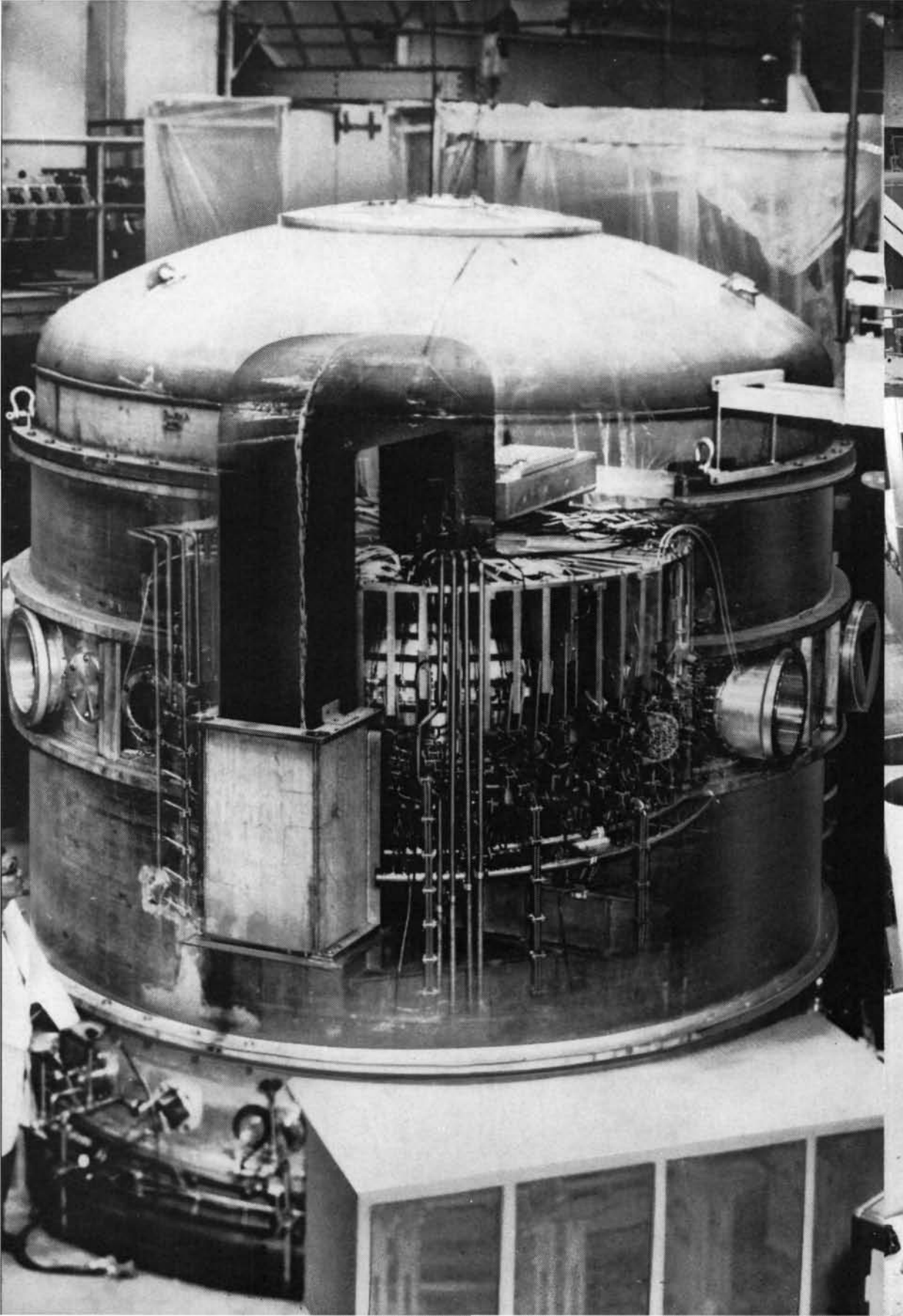
Photo au verso:

Le Tokamak T-6, l'une des grandes machines

expérimentales, utilisé pour la recherche sur la fusion en URSS. Photo: URSS







diffuse, 2) les stellarators et systèmes assimilés dans lesquels, contrairement à ce qui se passe dans les Tokamaks et dispositifs à striction diffuse, il n'y a pas de courant annulaire de plasma net, et 3) les configurations toriques à striction azimutale dont le meilleur exemple aux fins de ce présent article est peut-être la grande machine Scyllac du laboratoire scientifique de Los Alamos, dans laquelle un champ magnétique hélicoïdal se superpose au champ longitudinal principal dans le tore. Ce dispositif a fonctionné pour la première fois peu de temps avant la conférence et a produit un plasma stable de haute température et de forte densité pendant de brefs instants de l'ordre de quelques microsecondes.

Les successeurs de la bouteille magnétique

On sait depuis plusieurs années qu'un plasma dans un puits magnétique, c'est-à-dire un dispositif de confinement ouvert, connu autrefois sous le nom de bouteille magnétique ou machine à miroirs, est macroscopiquement stable. La conférence de Madison a montré que la recherche se concentre actuellement sur les mécanismes de fuite et sur les microinstabilités qui se manifestent au moment de la formation du plasma. Ces dispositifs peuvent contenir des plasmas très chauds (de 10 à 100×10^6 K) de densité relativement faible (de l'ordre de 10^{12} — 10^{13} ions par cm^3); ce sont probablement les dispositifs de confinement les mieux connus.

Plusieurs mémoires traitaient de divers aspects de systèmes hypothétiques de réacteur fondés sur les machines existantes — Tokamaks, stellarators, systèmes ouverts, etc. Il faut bien préciser que le problème est abordé sur un plan encore très théorique, mais les résultats obtenus sont prometteurs. Dans son exposé de synthèse, M. Bickerton faisait observer que «les progrès les plus spectaculaires sont ceux de la recherche à l'aide des Tokamaks. L'équipe de Princeton a confirmé les résultats obtenus par les Russes et ces derniers sont parvenus à atteindre des températures encore plus élevées en présence d'un courant plus intense dans le plasma». Après la conférence de Novosibirsk, plusieurs laboratoires ont entrepris de nouveaux travaux, notamment plusieurs projets de grand Tokamak actuellement en construction. M. Bickerton a ajouté que «pour le moment et en termes simples, on peut dire que les progrès dans l'avenir semblent devoir dépendre uniquement de la possibilité d'accroître le courant dans le gaz et d'appliquer des moyens de chauffage auxiliaires. Il se peut que l'on se heurte à des obstacles insurmontables sur cette voie royale de l'abondance; cependant, ce n'est qu'en y poursuivant notre chemin que l'on découvrira ces obstacles, pour autant qu'ils existent».

Coordination et collaboration

Ces obstacles dont parlait M. Bickerton existent peut-être effectivement, mais, en vérité, la conférence de Madison a montré qu'il y en a peu entre les scientifiques du monde entier. En particulier, la conférence a été l'occasion de réunir pour la première fois le Conseil international de la recherche sur la fusion créé pour étudier la planification et la

Le dispositif torique Ormak pour le confinement du plasma, semblable au Tokamak, mis au point au laboratoire national d'Oak Ridge. Ce montage photographique montre à la fois l'intérieur et l'extérieur de l'appareil. Photo: LNOR

coopération à long terme en ce qui concerne la recherche sur la fusion. Lors de ses prochaines réunions, le Conseil examinera en détail les programmes nationaux de recherche et peut-être suggérera d'entreprendre des projets internationaux.

Comme on le sait, la revue de l'Agence «Fusion nucléaire» paraît désormais plus souvent, à raison de six numéros par an. En outre, son contenu sera plus étoffé puisqu'il comportera les aspects technologiques de la fusion et l'on voit dans ces deux améliorations un indice de l'importance que prend cette publication. On prévoit un article résumant les travaux de la conférence de Madison dans un prochain numéro.

La conférence était réunie sous les auspices de l'Agence et organisée en collaboration avec la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis et avec l'Université du Wisconsin qui l'accueillait. Les précédentes conférences sur le sujet ont eu lieu en 1961, à Salzbourg (Autriche), en 1965 à Culham (Royaume-Uni) et, en 1969 à Novosibirsk (URSS). Les comptes rendus de la conférence de Madison seront publiés dans les prochains mois.

