

Production d'énergie nucléaire à partir d'isotopes de l'hydrogène

par J.A. Phillips*

Dans une salle obscurcie, le silence est rompu par le clapotis d'une pompe, le ronronnement de transformateurs et le claquement sec de relais qui s'enclenchent. Une lumière vive éclaire un ensemble complexe de tubes, de fils conducteurs et de bobines. Dans un coin des hommes plongent du regard dans des appareils photographiques ou sont plantés face à des tableaux embrasés de lueurs scintillantes. Une sonnerie retentit, les obturateurs des caméras s'ouvrent, puis quelques secondes plus tard résonne une violente détonation accompagnée d'un éclair éblouissant.

Une voix annonce:

"ETALONNEZ LES OSCILLOSCOPES, FERMEZ LES OBTURATEURS, PROCHAINE PRISE DANS DEUX MINUTES".

Des opérations comme celle qui vient d'être esquissée sont effectuées chaque jour dans de nombreux laboratoires de toutes les régions du monde. Elles relèvent de programmes portant sur la fusion thermonucléaire contrôlée ou, plus brièvement, la fusion. Le but: rapprocher des noyaux d'éléments légers et les fusionner en un noyau complexe qui explosera par la suite en libérant de l'énergie. Si cette recherche est encouragée, c'est que les isotopes lourds de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, recèlent de l'énergie. Or, le deutérium existe dans la nature; sur 7000 atomes d'hydrogène on trouve un atome de deutérium, et chacun sait que c'est de l'eau qu'on peut extraire l'hydrogène le plus facilement. On a calculé que les atomes de deutérium contenus dans un litre d'eau ordinaire renferment une énergie équivalant à 300 litres de supercarburant. Vu la masse d'eau que représentent les océans, nous disposons ainsi d'une source d'énergie pratiquement inépuisable, à condition de pouvoir l'exploiter.

Le désir de capter cette source d'énergie anime les hommes de science de toutes les parties du monde. Les problèmes scientifiques et techniques, qui seront esquissés ci-après, sont considérables et dépassent jusqu'à présent nos capacités. Toutefois, pour faire progresser cette recherche aussi rapidement et systématiquement que possible, on procède à des échanges internationaux de renseignements par la voie de conférences, de colloques et de groupes de travail, comme les conférences sur la physique des plasmas et la fusion contrôlée récemment tenues en Suisse et au Royaume-Uni, et le séminaire sur la fusion par lasers organisé à Trieste.

* Chef de la Section de physique, Division de la recherche et des laboratoires.

Les principales règles à suivre pour libérer l'énergie contenue dans les isotopes de l'hydrogène ne sont guère difficiles à énoncer: 1) Porter la température d'une petite quantité de deutérium (qui est un gaz) à 100 000 000°C; à de telles températures, les noyaux sont animés d'un mouvement si rapide qu'ils peuvent fusionner; 2) Contenir la pression atteinte dans le gaz chaud ou plasma pendant une durée de quelques secondes au maximum. On s'apercevra aussitôt qu'il y a là un obstacle majeur constitué par le récipient (caisson de réacteur) destiné à retenir ce gaz. Il est évident qu'aucun matériau ne peut résister longtemps à ces températures sans se vaporiser; rappelons-nous que la surface du soleil n'est qu'à 5700°C? C'est là un défi lancé à l'ingéniosité de l'homme et plusieurs méthodes ont déjà été proposées et sont encore à l'examen. Celle qui semble avoir le plus de chance d'être retenue, consiste à intercaler entre le plasma et la paroi du réacteur un champ magnétique — couche isolante qui sépare la région de haute température du matériau constitutif de la paroi et à travers laquelle le transfert d'énergie est réduit au minimum. Aussi a-t-on procédé à des expériences en vue de concevoir et d'essayer différentes bouteilles magnétiques qui éloigneraient le plasma des parois matérielles et permettraient de le porter aux températures nécessaires pour la fusion.

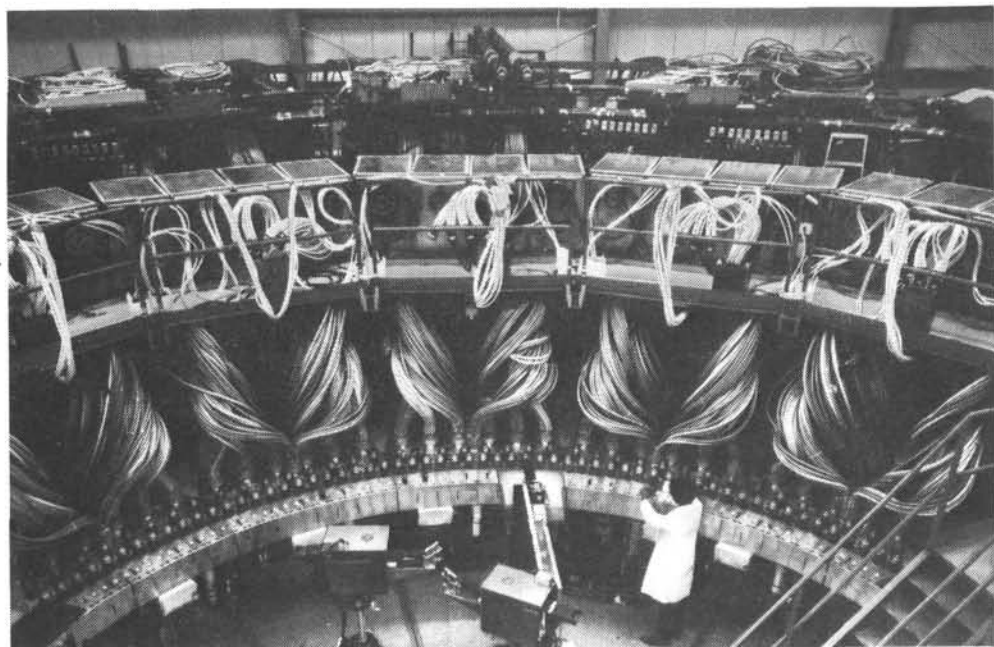
Et disposant d'une "bouteille" de cette nature, comment peut-on porter l'hydrogène gazeux à la température requise? Ce problème s'est révélé être relativement simple et peut être résolu de différentes façons: passage d'un courant de plusieurs milliers d'ampères par le plasma qui sera ainsi chauffé comme dans un four électrique; injection d'atomes neutres de haute énergie (qui, étant neutres, traversent librement le champ magnétique) dans le plasma où ils sont ionisés et arrêtés, leur énergie étant communiquée au plasma; excitation du plasma par des champs haute fréquence. Les conditions nécessaires à la fusion seront ainsi réunies et l'énergie libérée par le plasma en combustion apparaîtra sous la forme d'un rayonnement ultra-violet intense qui échauffera la surface de la paroi du réacteur. En refroidissant cette paroi on peut produire de la vapeur. En outre, de nombreux neutrons de haute énergie seront émis pendant le processus de la fusion; ils seront ralentis dans des couches hydrogénées et utilisés pour produire du tritium, troisième isotope de l'hydrogène, par absorption dans du lithium. Le tritium peut aussi être employé comme combustible.

EXPERIENCES

Au début des années 50, on a abordé sérieusement la fusion avec un enthousiasme sans bornes. On a réalisé des dispositifs expérimentaux baptisés de noms fantaisistes tels que Perhapsatrons (du mot anglais perhaps significatif dans ce contexte: peut-être réussiras-tu, peut-être pas), Scyllas, Stellarators, Zetas (voir photo 1), machines à miroirs, etc. Vers la fin des années 50, on a, aux Etats-Unis d'Amérique, porté pour la première fois une goutte de plasma à une température thermonucléaire et obtenu une combustion nucléaire perceptible. On s'aperçut rapidement toutefois que la nature avait quelques surprises en réserve; en particulier, l'interface plasma champ magnétique ne demeurerait pas stable mais se disloquait très vite, dans l'espace d'un millième de seconde ou moins, en permettant au plasma chaud de s'écouler à travers le champ magnétique. Le plasma se trouvait ainsi refroidi et le confinement devenait inopérant. En se ressouvenant de cette époque passée, on peut dire qu'elle fut surtout marquée par l'activité des théoriciens qui, à chaque conférence sur la fusion, annonçaient aux expérimentateurs consternés une nouvelle instabilité, une autre voie par laquelle le plasma pouvait être perdu. On constata que les oscillations commençaient par perturber la surface en provoquant des plissements et des ondes qui aboutissaient à sa rupture suivie d'une turbulence générale.

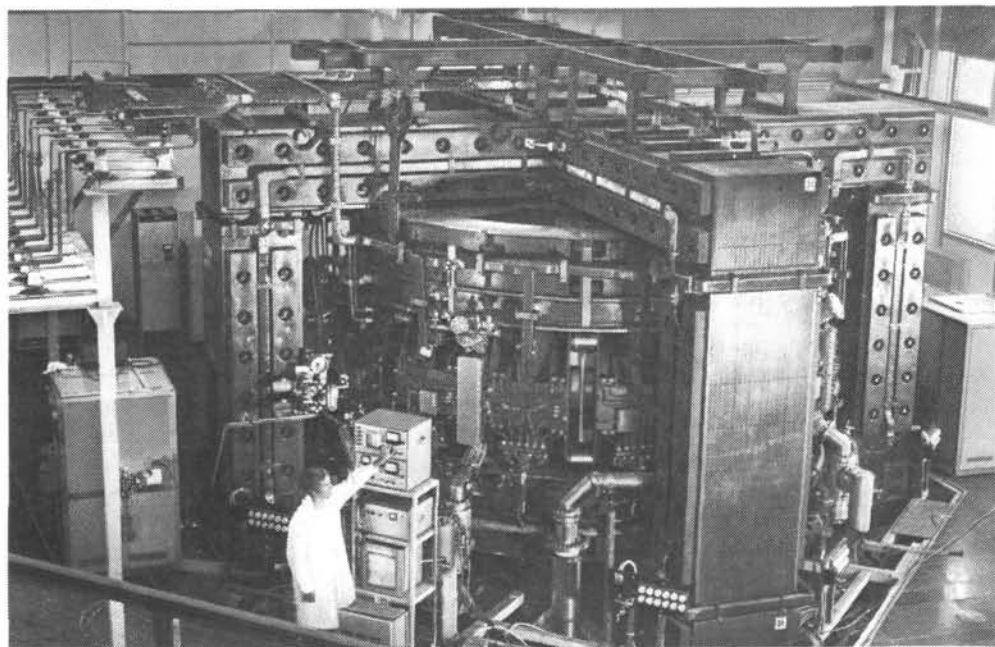
CONFIGURATION TOKAMAK

Après quelques années de travail théorique ardu et d'expériences, il semble que les principes physiques fondamentaux du confinement des plasmas soient sur le point d'être élucidés.



Scyllac, machine torique à striction azimutale du Laboratoire de Los Alamos (Nouveau-Mexique, E.-U.A.). La chambre de décharge est contenue dans l'anneau d'aluminium, les nombreux câbles amenant le courant nécessaires pour produire les champs magnétiques de chauffage et de confinement. Photo: Los Alamos Scientific Lab. (photo 1).

T-10, grande machine tokamak achevée récemment à l'Institut Kourtchatov de Moscou (URSS). Le tube de décharge a un diamètre intérieur de 78 cm, un champ magnétique torique de 5 teslas et un courant de décharge de 0,8 million d'ampères. Photo: Institut Kourtchatov (photo 2).



En outre, une méthode élaborée en Union soviétique, dite méthode Tokamak, a donné des résultats les plus encourageants en permettant de confiner des plasmas chauds (de 10 millions de degrés) en état de repos relatif, pendant plusieurs millisecondes. La plupart des grands laboratoires du monde ont maintenant construit des dispositifs expérimentaux selon les mêmes principes et reproduit ces résultats.

HISTORIQUE DU CONSEIL INTERNATIONAL DE LA RECHERCHE SUR LA FUSION

En 1968, l'AIEA fut d'avis qu'étant donné le nombre de travaux exécutés dans le domaine de la fusion nucléaire, il pourrait être sage de créer une tribune internationale qui permettrait aux pays exécutant des programmes de recherche sur la fusion de confronter leurs idées et de discuter leurs programmes, tout en donnant des avis à l'Agence. Après des discussions préliminaires entre les meilleurs spécialistes des pays qui s'occupent des programmes de recherche sur la fusion, une réunion préparatoire fut prévue pour le début de 1970. Comme première mesure il fut décidé d'évaluer les possibilités actuelles de production d'énergie par fusion, et de distribuer une liste des principales installations existant dans le monde. La réunion eut lieu en juin 1970, à Trieste, et un rapport fut ultérieurement publié dans la revue de l'Agence "Fusion nucléaire". Après avoir consulté les gouvernements intéressés, l'Agence décida de créer, à titre permanent, le Conseil international de la recherche sur la fusion (CIRF). Les dix pays les plus avancés dans la recherche en ce domaine furent invités à nommer chacun un membre au CIRF, et celui-ci tint sa première réunion à l'occasion d'une des conférences de l'Agence sur la fusion qui eut lieu à Madison (Etats-Unis d'Amérique) en 1971.

Depuis lors, le Conseil se réunit pour le moins une fois par an, en règle générale à l'endroit où a lieu une grande conférence sur la fusion.

Au cours des dernières conférences, les centres de recherche de toutes les parties du monde ont signalé des progrès techniques. Lors des travaux de recherche selon le procédé Tokamak, des plasmas stables sont confinés pendant plusieurs dizaines de millisecondes à des températures de 20 millions de degrés. La contamination néfaste par des atomes lourds provenant des parties métalliques de la machine est pratiquement supprimée dans certaines expériences alors que dans d'autres elle demeure relativement faible. Toutefois, le temps de confinement de l'énergie — valeur indiquant dans quelle mesure la couche isolante (champ magnétique) s'oppose à l'expansion du gaz chaud vers les parois froides — demeure encore dans toutes les expériences assez petit, de l'ordre de 20 millisecondes. On estime que pour un réacteur à fusion il faut obtenir des valeurs 100 fois voire 1000 fois plus élevées.

Sous ce rapport, les travaux sur la fusion entrent maintenant dans une phase importante et passionnante. Deux grands dispositifs expérimentaux, le PLT (Princeton Large Tokamak) aux Etats-Unis et le T-10 (Tokamak-10) en Union soviétique (voir photo 2), ont déjà commencé à fonctionner. Une de leurs caractéristiques les plus importantes est la grande étendue et la forte épaisseur de la couche isolante entre le gaz chaud et la paroi métallique. Si nos idées sur les lois de proportionnalité sont exactes, ces machines devraient permettre de multiplier la durée de confinement obtenue dans les dispositifs antérieurs par un facteur de quelques unités. La confirmation de cette hypothèse stimulera vigoureusement la construction de machines onéreuses de très grandes dimensions qui pourraient produire une énergie équivalant à celle dont on a besoin pour chauffer le plasma (c'est-à-dire pour satisfaire aux critères dits de Lawson). Ce serait là une réalisation remarquable. Ces grands dispositifs sont maintenant à l'étude en Union soviétique, au Japon, à l'EURATOM et

aux Etats-Unis. Des plans sont actuellement établis en vue de construire un réacteur à fusion pour la production d'énergie électrique vers la fin des années 90 ou au début du prochain millénaire, lorsqu'on disposera de la documentation relative à ces machines. L'importance des capitaux affectés à la recherche sur la fusion suit le rythme des progrès techniques. Ainsi, les Etats-Unis ont prévu un crédit de 140 millions de dollars au titre de

ETABLI PAR L'AGENCE

Le CIRF est devenu une tribune pour l'examen des grands programmes de recherche sur la fusion qui sont réalisés dans les divers pays. C'est la première fois que des projets d'expériences coûteuses sont préalablement étudiés sur un plan réellement international.

Le CIRF est ainsi en mesure de donner des avis à l'Agence au sujet de son programme coordonné de recherche sur la fusion, en prenant en considération toutes les activités de l'Agence depuis l'assistance technique et des bourses jusqu'aux publications, y compris la revue Fusion nucléaire, en passant par les programmes de recherche, les groupe de travail, les groupes d'étude et les colloques. On estime que cette collaboration pourra éventuellement aboutir à la mise en oeuvre de grands projets internationaux.

C'est avec un sentiment de gratitude que l'Agence se souvient de ces cinq à six dernières années, et elle remercie les pays engagés dans d'importants travaux sur la fusion de l'aide insigne et des conseils précieux dont ils l'ont fait bénéficier, confirmant ainsi la communauté de l'objectif, qui est de parvenir dans les meilleurs délais à produire de l'énergie par la fusion. Le CIRF créé par l'Agence est maintenant reconnu comme faisant autorité dans le domaine de la recherche internationale sur la fusion.

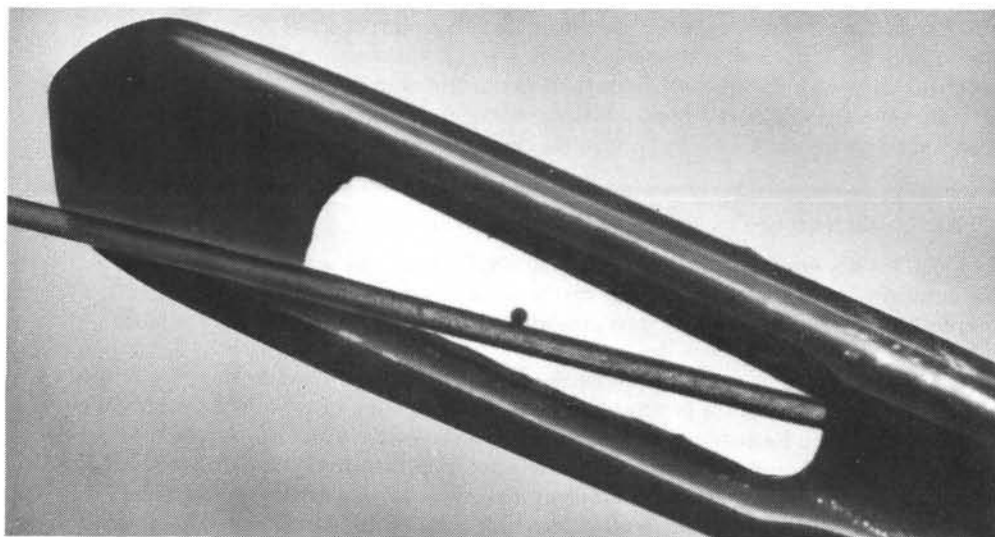
H. Seligman

l'exercice financier 1976, et des sommes encore plus importantes seront demandées pour les années à venir.

LASERS

Au cours de ces dernières années, on s'est aussi penché sur d'autres méthodes pour libérer l'énergie de fusion, notamment sur celle qui consiste à focaliser un faisceau de lumière intense sur une petite pastille de deutérium, ce qui provoque la vaporisation de la surface. Le gaz chaud en expansion comprime à son tour la pastille, en augmente la densité et porte la température au niveau de celle qui est nécessaire pour la combustion thermonucléaire. Le faisceau lumineux doit avoir une puissance énorme, de l'ordre de 10^{14} watts ou de 100 000 joules par picoseconde (10^{-12} sec.), qui ne pourra être obtenue qu'à l'aide de lasers très puissants. Des expériences sur la méthode dite de fusion par lasers sont effectuées dans de nombreux pays, et les premières réactions nucléaires induites à une température réellement thermonucléaire ont déjà été signalées.

Pour le moment, les lasers disponibles sont d'une puissance très faible et les pastilles cibles sont nécessairement trop petites. La photo 3 montre un des microballons, sphère de verre creuse d'environ 0,005 cm de diamètre contenant de l'hydrogène gazeux à une pression de plus de 50 atmosphères. Sur la photographie, le microballon est posé sur un cheveu et la grande ouverture est le chas d'une aiguille! En règle générale c'est avec ces cibles, semble-t-il, que sont actuellement réalisées, dans des mélanges deutérium-tritium gazeux, les conditions indispensables à une combustion thermonucléaire. Grâce aux puissants lasers maintenant à l'étude ou en construction, les conditions requises pour répondre aux critères de Lawson seront probablement réunies aux environs de 1980.



Microballon actuellement utilisé dans les machines de fusion à laser. Le microballon (diamètre ~ 50 millièmes de mètre, rempli de gaz D-T à la pression de 50 atmosphères) repose sur un cheveu. La grande ouverture est le chas d'une aiguille. Photo: Los Alamos Scientific Lab. (photo 3).

L'intérêt de la fusion réside essentiellement dans les possibilités offertes par la grande source d'énergie que constituent les isotopes lourds de l'hydrogène. (Le premier réacteur à fusion consommera du deutérium et du tritium, qui sont les deux isotopes lourds de l'hydrogène, le tritium devant être reconstitué dans du lithium; ce réacteur utilisera alors en fait du deutérium et du lithium. Dans la deuxième phase qui comportera des filières plus perfectionnées, on n'utilisera peut-être que du deutérium.) En outre, un réacteur à fusion est intrinsèquement sûr en ce sens que la puissance explosive de la quantité de combustible qu'il contient à un moment quelconque est négligeable. Il n'exige aucune matière fissile. Cependant, même le défenseur le plus ardent des réacteurs à fusion doit reconnaître que ces réacteurs ont un effet sur l'environnement et comportent un risque radiologique. Se poseront aussi le problème de la manipulation sans risques du tritium gazeux et celui de la radioactivité induite dans les constructions métalliques. Ces problèmes peuvent être résolus et il est heureux qu'on dispose encore du temps nécessaire avant que le réacteur à fusion ne devienne une réalité.

AIEA

La fusion constitue un domaine qui passionne la communauté scientifique internationale; l'Agence y joue un rôle important en réunissant tous les deux ans des conférences internationales sur la physique des plasmas et la recherche relative à la fusion thermonucléaire contrôlée, en organisant des groupes de travail et des séminaires sur des questions spécialisées, auxquels assistent des participants de divers pays, en publiant des articles scientifiques et des rapports généraux dans la revue "Fusion nucléaire", et en rassemblant et comparant entre elles les constantes nucléaires, atomiques et moléculaires que communiquent les banques de données de toutes les parties du monde.

Au cours de ces vingt dernières années, la recherche sur la fusion fut pour certains d'entre nous une tâche ingrate mais passionnante. A l'heure actuelle, le domaine est en pleine expansion grâce à l'afflux de spécialistes, de nouvelles idées et de capitaux. Même si des obstacles imprévus devaient surgir et freiner le progrès, une chose est certaine: l'homme étant ce qu'il est, la production d'énergie à l'aide de réactions thermonucléaires contrôlées finira bien par devenir une réalité.