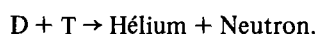


Le rapprochement des recherches sur la fusion

par M. Leiser*

C'est en 1929 que fut pour la première fois avancée l'idée selon laquelle la fusion des noyaux d'éléments légers pouvait être responsable de l'énergie produite par les étoiles. Le mécanisme, tel qu'il a été imaginé, ressemble par certains côtés au processus, mieux connu, de la fission. Dans le cas de la fission, le noyau d'un élément possédant un nombre de masse élevé est amené à se diviser en deux noyaux plus légers. Du fait que l'énergie de liaison des éléments lourds est inférieure à celle des éléments intermédiaires, la différence de masse qui en résulte est libérée sous forme d'énergie. L'énergie de liaison des éléments légers est toutefois elle-même inférieure à celle des éléments intermédiaires. Par conséquent, la fusion de deux éléments légers entraînera elle aussi une production d'énergie, puisqu'il y aura eu différence de masse.

Trois conditions expresses doivent être réunies pour permettre des réactions de fusion continues. La température T des gaz ionisés ou du plasma doit être suffisamment élevée afin de permettre aux particules en mouvement de s'approcher suffisamment pour qu'il y ait interaction; la densité n doit être assez grande pour que se produise un nombre suffisant de réactions; enfin, le plasma doit être confiné durant un temps t suffisamment long pour qu'il y ait production d'énergie. Des diverses réactions de fusion possibles, celle qui exige pour ces paramètres les valeurs les plus faciles à atteindre est la réaction du deutérium et du tritium:



Le seuil à franchir pour que la fusion soit entretenue est exprimé par le critère dit de Lawson qui, pour cette réaction, s'écrit:

$$n \cdot t \sim 10^{14} \text{ s} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ à une température } T \geq 10^8 \text{ K.}$$

Le grand intérêt de la fusion en tant que source d'énergie est dû au combustible utilisé. Le deutérium est présent dans l'eau de mer dans la proportion d'une molécule pour 6500 molécules d'eau ordinaire, et sa séparation est aisée. De plus, le neutron libéré peut servir à produire du tritium dans les matières contenant de l'hydrogène, rendant ainsi le réacteur à fusion indépendant des apports externes en tritium. L'énergie nucléaire de fusion constituera, si on parvient à la mettre en valeur, une source quasiment inépuisable d'énergie. Bien que les études économiques, fondées sur la compréhension actuelle de la physique et de la technologie des réacteurs à fusion, mettent en doute la rentabilité à court terme d'une telle installation, l'énergie de fusion sera sûrement une perspective d'autant plus

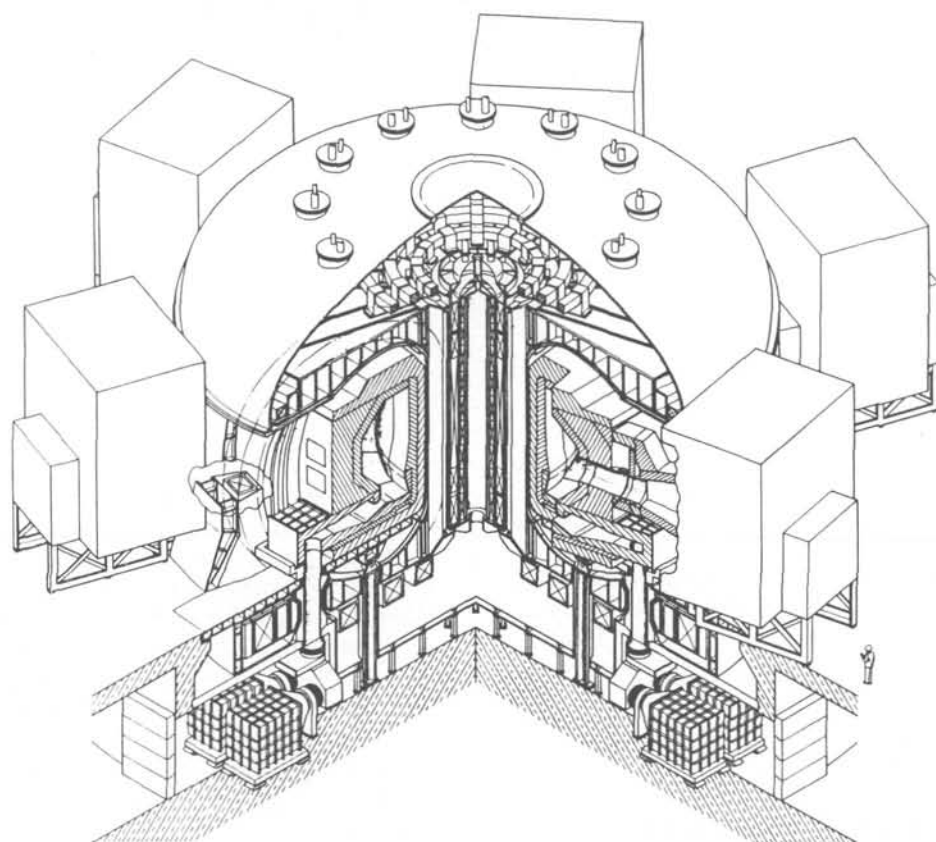
attirante que les réserves traditionnelles de combustible iront en s'amenuisant. D'ailleurs, les perspectives que la fusion laisse entrevoir sont telles qu'aujourd'hui tous les pays technologiquement avancés soutiennent activement un programme de recherche sur la fusion.

Les premières recherches relatives au chauffage et au confinement du plasma, placées sous le sceau du secret, ont été conduites de manière autonome par les Etats-Unis, le Royaume-Uni et l'URSS. En 1958, un accord international a levé le secret qui entourait les résultats de ces recherches, rendant possible l'échange d'informations, et permettant d'ouvrir des perspectives d'avenir pour la coopération internationale dans le domaine de la recherche sur la fusion.

Depuis cette date, des progrès réguliers et encourageants ont été obtenus dans la compréhension des processus fondamentaux régissant le comportement des plasmas en interaction. Tout en reconnaissant la nécessité d'approfondir les études, sur ce point précis aussi bien que dans d'autres domaines, et plus particulièrement sur les aspects technologiques de la fusion, l'opinion unanime de la communauté mondiale des spécialistes de la fusion est qu'aucun obstacle sérieux ne devrait compromettre la construction, à terme, d'un réacteur à fusion capable de produire de l'énergie. Voici quelques-unes des questions majeures au plan technique que l'on s'efforce actuellement de résoudre: l'élimination des impuretés; le rechargement en combustible; l'élimination des cendres; les lois d'échelle — la possibilité, à partir de la génération actuelle de machines, d'extrapoler la suivante, aux dimensions plus grandes; la physique des plasmas; le choix d'un réacteur — bien que l'on étudie actuellement des conceptions diverses afin de déterminer si elles pourraient convenir pour la réalisation d'une centrale à fusion, la solution la plus prometteuse est celle du tokamak et chacun des principaux concurrents en lice s'achemine peu à peu vers la mise au point d'une machine de ce type (JET — Communauté européenne, TFTR — Etats-Unis, JT60 — Japon, T10 — URSS); les problèmes d'ordre technologique — mise au point d'un électroaimant à supraconduction, technologie du vide, étude de matériaux.

Au début des années soixante, l'intervention de l'Agence dans le domaine de la fusion se bornait à l'organisation d'une ou deux réunions par an. Ainsi, une Conférence internationale sur la physique des plasmas et la recherche concernant la fusion nucléaire contrôlée s'est tenue en 1961 à Salzbourg, avec la participation d'environ 350 personnes. Cette conférence, qui ne devait être que la première du genre, fut suivie d'une autre en 1965; puis elles se succédèrent au rythme d'une conférence tous les trois ans jusqu'en

* M. Leiser dirige la Section de physique à la Division de la recherche et des laboratoires de l'Agence.



La configuration d'INTOR vue par un artiste.

1976, année où l'on passa à un cycle biennal. Pour la prochaine, qui aura lieu en septembre 1982, on attend quelque 600 participants. Avec le temps, ces conférences ont joué un rôle de plus en plus important dans l'information de la communauté internationale sur les derniers résultats de la recherche sur la fusion. La conférence de 1982 sera la réunion la plus vaste en son genre qui se sera tenue à ce jour.

Vers un engagement accru de l'Agence

L'intérêt manifesté par l'AIEA pour les questions se rapportant à la fusion est allé de pair avec les efforts croissants qui sont consacrés à ce domaine. Il se peut que l'un des aspects les plus importants de cet engagement soit de permettre aux scientifiques appartenant aux laboratoires les plus importants du monde de se réunir afin de discuter de leurs travaux. Des réunions de comités techniques, des sessions de travaux spécialisés et des conférences sont organisés sur un grand nombre de sujets divers se rapportant à la fusion. L'Agence apporte également une aide technique aux pays en développement qui s'efforcent de mettre au point leurs propres programmes relatifs à la fusion.

Les lacunes que font encore apparaître les travaux de recherche visant la mise au point d'un réacteur à fusion ont été recensées et on s'emploie actuellement à les combler. L'Agence publie *Fusion nucléaire*, une revue sans équivalent qui traite exclusivement de la

fusion et présente des articles rédigés par des scientifiques du monde entier. En 1976, a été publié un catalogue des installations de fusion nucléaire situées de par le monde, et une mise à jour doit paraître en 1982. Cette publication aura constitué un apport précieux pour les chercheurs du monde entier.

L'Agence a en outre conclu un certain nombre de contrats avec des pays en développement pour leur prêter son concours dans le cadre de leurs propres recherches portant sur la fusion, tout en les aidant par l'intermédiaire du Programme de coopération technique. Un autre programme d'activités est envisagé pour les pays qui ont déjà établi leur propre programme de fusion nucléaire. L'objectif visé est à la fois de former des étudiants de ces pays et de coordonner la recherche effectuée par les scientifiques chevronnés, afin de permettre l'intégration des travaux de ces derniers dans l'ensemble des efforts déployés à l'échelle mondiale. Un groupe consultatif a été formé en vue de conseiller l'Agence sur toutes ces activités. Il s'agit du Conseil international de la recherche sur la fusion qui s'est réuni pour la première fois en 1971. Il est composé de personnalités des pays les plus avancés au plan de la recherche sur la fusion. Le Conseil s'est révélé être un organisme extrêmement utile par les conseils qu'il donne à l'Agence pour la coordination des travaux de recherche sur la fusion effectués dans le monde, et par la possibilité qu'il offre de débattre librement des programmes de fusion nationaux.

Le projet Intor

L'émergence d'un consensus très large quant à l'excellence des progrès accomplis dans la recherche sur la fusion a conduit l'Agence à entreprendre dans ce domaine une action encore plus importante. Prenant acte des progrès accomplis, le Directeur général de l'AIEA demanda en 1978 que soient formulées des propositions pour la création d'un programme élargi qui, bénéficiant d'une collaboration internationale, accélérerait la mise au point de la technique de la fusion. Cette idée fut accueillie favorablement et conduisit à l'institution de réunions techniques sur un réacteur tokamak international (INTOR). Organisées par l'AIEA, ces réunions visaient à déterminer la nature, les objectifs de programmation et les objectifs techniques du prochain dispositif, celui qui succéderait à ceux qui sont actuellement en construction, et à répondre à la question de savoir si les bases scientifiques et techniques nécessaires à la réalisation d'un tel dispositif seraient disponibles dans un proche avenir. L'idée du Conseil international de la recherche sur la fusion était que le dispositif Intor contribuerait dans une grande mesure à établir la faisabilité technique de la fusion nucléaire et à faire la démonstration que l'on peut obtenir un plasma ayant les caractéristiques requises par les réacteurs tokamak. Participent aux travaux d'Intor la Communauté européenne (Euratom), les Etats-Unis d'Amérique, le Japon et l'Union des Républiques socialistes soviétiques.

La phase initiale des travaux eut lieu en 1979 et les résultats en furent publiés par l'AIEA sous la forme d'un rapport intitulé *Intor – Réacteur tokamak international: phase zéro*. Ce rapport, ainsi que les propositions qui y étaient contenues, suscitèrent un vif intérêt. En accord avec les gouvernements intéressés, l'AIEA passa à l'étape suivante du projet Intor, avec la mise en place de la phase dite de définition.

A ce stade, le but essentiel était d'arriver à établir un modèle théorique étayé par un rapport. Ce dernier, intitulé *Intor – Réacteur tokamak international: phase un*, décrit les objectifs assignés au dispositif ainsi que sa place dans l'ensemble des activités mondiales; ce rapport présente le modèle théorique du tokamak Intor ainsi qu'une analyse technique détaillée des principes retenus pour le modèle, qui doivent permettre de réaliser les objectifs globaux assignés au tokamak Intor. Le rapport a été publié en avril 1982.

Il ressort clairement du rapport qu'Intor devrait être, selon les prévisions actuelles, un dispositif expérimental de grandes dimensions: un réacteur de 600 MW(th). Si le projet est réalisé, la construction et l'exploitation de ce dispositif représenteront une tâche considérable. Il importe donc à la fois d'optimiser les informations relatives à la programmation susceptibles d'être fournies par Intor et de soumettre le modèle théorique à un examen critique en vue de l'affiner. Aussi l'AIEA a-t-elle prolongé, sur la recommandation des gouvernements intéressés, les travaux d'Intor en lançant une «phase IIA», pour laquelle le Conseil international de la recherche sur la fusion a fixé les objectifs suivants:

- Effectuer une analyse des coûts, des avantages et des risques, dans laquelle on fera varier les objectifs à atteindre et les paramètres d'Intor afin d'en percevoir

les effets sur les coûts, les risques et le calendrier de réalisation du dispositif Intor lui-même et du programme de mise au point de la fusion en général.

- Etudier les répercussions possibles des progrès prévisibles dans le domaine des sciences physiques, comme par exemple l'exploitation en courant continu et le chauffage haute fréquence.

- Analyser en profondeur certaines questions déterminantes pour la conception: configuration mécanique et aptitude à la maintenance; production et utilisation du tritium; conception de la première paroi; élimination des impuretés; configuration du déflecteur, etc.

- Ebaucher la conception d'installations avancées d'essai du tore, comme par exemple un segment combiné de production de tritium et d'électricité, ainsi que d'installations complémentaires pour les essais de composants n'ayant pas trait à la fusion.

- Définir des projets précis d'études et de recherche nécessaires à la conception d'Intor.

- Présenter un rapport sur les moyens d'optimiser le modèle théorique.

Chacun des partenaires intéressés par le projet Intor a désigné quatre participants qui se sont réunis plusieurs fois par an à Vienne pour définir les activités à entreprendre, examiner et discuter les contributions de chacun des partenaires et rédiger le rapport des réunions. (Lorsqu'il le fallait, des experts venaient s'adjoindre à ces participants.) La majeure partie des travaux réalisés pour le compte du projet Intor a été le fait d'experts travaillant dans leurs établissements respectifs. Une centaine de scientifiques et ingénieurs de haut niveau ont ainsi pris part aux travaux, ce qui a représenté pour chacun des quatre partenaires entre 10 et 20 années-homme pour la phase zéro, et à peu près 15 à 20 années-homme pour la phase un.

Certaines autres caractéristiques du projet Intor méritent encore d'être rappelées. Le parrainage de l'Agence a permis d'arriver à un niveau de coopération internationale auquel on n'aurait guère pu parvenir sinon. La contribution d'experts des principaux pays ou groupes de pays travaillant dans le domaine de la fusion a conféré un haut niveau aux travaux. Les résultats atteints à ce jour ont permis de poser clairement, de manière systématique, les problèmes qu'il faut aborder et résoudre sur la voie menant à la fusion nucléaire, et ont attiré l'attention de tous les spécialistes de la fusion sur ces problèmes. A souligner aussi le caractère «individualisé» de ces travaux. Chaque fragment de l'activité entreprise constitue de la sorte un apport utile et précieux pour l'ensemble des travaux relatifs à la fusion, et ceci indépendamment des décisions qui pourraient être prises quant à la suite à apporter au projet Intor. Les travaux en cours, c'est-à-dire ceux de la phase IIA dont il a été question plus haut, doivent être terminés en juin 1983, et d'ici là les partenaires auront pu s'entendre sur la suite du projet Intor. Si tel est le souhait des participants, l'AIEA est prête à apporter son soutien actif à ce qui apparaît comme un modèle de coopération internationale pour l'utilisation pacifique de l'énergie atomique.