

# ETAT ACTUEL DES RECHERCHES SUR LA FUSION NUCLEAIRE CONTROLEE

M. Léon A. Artsimovitch, membre du Présidium de l'Académie des sciences de l'URSS et chef de la Division de physique générale et appliquée, ainsi que du Département de la physique des plasmas, a fait, à l'occasion de la onzième session ordinaire de la Conférence générale, un exposé d'ensemble sur les recherches qui visent à brûler un combustible nucléaire pratiquement inépuisable en utilisant le phénomène de la fusion. Estimant que la mise au point des méthodes qui permettent d'obtenir ce nouveau combustible — un plasma ou milieu ionisé à haute température — a fait des progrès, il a souligné l'importance de poursuivre les efforts sans relâche.

L'exposé de M. L.A. Artsimovitch est résumé ci-après.

L'orateur a expliqué qu'il s'agissait de mettre au point des méthodes permettant d'utiliser l'excédent d'énergie nucléaire emmagasiné dans les deux isotopes de l'hydrogène appelés deutérium et tritium (le noyau de l'hydrogène se compose d'un seul proton, celui du deutérium possède en outre un neutron et celui du tritium deux neutrons). L'énergie susceptible d'être libérée lors de la fusion de ces isotopes est, par unité de poids du combustible nucléaire, sensiblement supérieure à celle que fournissent les réactions de fission mieux connues de l'uranium et d'autres éléments lourds. Les ressources en deutérium sont pratiquement inépuisables, ce qui rend la perspective d'exploiter cet excédent d'énergie particulièrement séduisante. Cependant, les réactions de fusion ne peuvent se produire qu'à des températures de l'ordre de 100 millions de degrés ou plus. A cette condition seulement les noyaux acquièrent des vitesses suffisantes pour vaincre leur répulsion électrostatique mutuelle et entrer en réaction. Pour cette raison ces réactions sont appelées «réactions thermonucléaires contrôlées».

A des températures de cet ordre, toute substance cesse de constituer un milieu neutre et ne peut plus exister qu'à l'état de plasma chaud entièrement ionisé, mélange inséparable d'ions positifs et d'électrons négatifs rapides. Pour pouvoir employer ce plasma comme combustible dans une génératrice thermonucléaire, il faut que l'énergie libérée par fusion soit supérieure aux pertes d'énergie thermique et surtout à celles, apparemment inévitables, qui sont dues au rayonnement X émis lors des collisions entre particules. Cela signifie qu'en employant du deutérium pur, on pourrait obtenir un excédent d'énergie à des

températures dépassant 300 millions de degrés ou, en cas d'utilisation de deutérium et de tritium en proportions égales, à 200 millions de degrés. Un réacteur thermonucléaire ne peut être productif que si chaque noyau a de bonnes chances de participer à une réaction de fusion. Selon les données actuelles, le combustible le plus efficace serait un mélange de deutérium et de tritium. Or, malheureusement ce dernier n'existe pratiquement pas à l'état naturel. Il serait éventuellement possible de le produire en cours d'exploitation, mais à la longue, c'est le deutérium qui jouera le rôle principal.

## REALISATION D'UN CONFINEMENT SOUS VIDE

Le chauffage du plasma doit se faire dans des conditions qui permettent de conserver l'énergie thermique pendant des périodes prolongées; c'est là que réside la principale difficulté. Un plasma à haute température constitue un conducteur de chaleur presque parfait et doit donc être complètement isolé des parois du récipient qui le contient, dans les conditions d'un vide poussé. L'idée d'obtenir ce confinement à l'aide d'un champ magnétique se trouve à la base de toutes les réalisations. Aux premiers stades, elle semblait devoir être la baguette magique qui amènerait la nature à révéler tous ses secrets, mais sa mise en œuvre a suscité de grandes difficultés. Aussi est-on parvenu très vite à l'évidence que les aspects technologiques ne pourraient faire l'objet d'une étude approfondie qu'après la création d'une nouvelles discipline scientifique, celle de la «physique des plasmas à haute température».

Les recherches se sont orientées dans trois voies principales. La première consistait à utiliser des pièges magnétiques à extrémités ouvertes maintenant le plasma à l'intérieur d'une région d'où les lignes de force s'échappent vers l'extérieur. Le confinement est fondé sur le fait qu'une particule chargée se déplaçant le long d'une ligne de force vers le champ d'intensité croissante subit un ralentissement. Si l'angle formé par la direction de sa vitesse et la ligne de force est suffisamment grand, la particule s'approchant de la région du champ magnétique intense sera renvoyée comme par un miroir. Il s'ensuit qu'en augmentant l'intensité du champ le long des lignes de force de part et d'autre d'une région centrale, il devient possible de piéger les particules de plasma dans un volume restreint entre les miroirs magnétiques.

La deuxième tendance a été l'étude du comportement de couronnes de plasma produite dans des systèmes magnétiques de type torique (en forme d'anneau). Dans un dispositif de ce genre, le plasma peut s'écouler librement le long des lignes de force magnétiques. Il en existe plusieurs variantes communément désignées sous le nom de «pièges magnétiques fermés».

Qu'ils soient ouverts ou fermés, les pièges sont destinés à créer des conditions de confinement que l'on pourrait appeler «quasi stationnaires»; cela signifie que la durée de vie d'une particule rapide dans le piège dépasse de plusieurs ordres de grandeur le temps nécessaire pour lui permettre de traverser une fois le volume du piège. En d'autres termes, la particule subira de très nombreuses oscillations entre les frontières qui délimitent la région occupée par le plasma.

M. Lev A. Artsimovitch faisant le point des recherches sur la fusion.



Outre les systèmes de confinement quasi stationnaire, il existe des dispositifs pour un chauffage très rapide du plasma par compression à l'aide d'un champ magnétique croissant. On peut ainsi obtenir une concentration d'énergie maximale dans un très petit volume pendant des intervalles de temps très courts. Ces dispositifs dits «à striction rapide», utilisent des champs magnétiques dont l'intensité augmente dans l'espace de quelques millièmes de seconde. Le procédé le plus simple consiste à provoquer une décharge dans un gaz à l'aide d'une source haute tension. Le courant traversant le gaz l'ionise et le champ magnétique comprime le plasma en un mince filament à haute température. Le courant de décharge contribue également à chauffer le plasma. Cette méthode semblait séduisante en raison de sa simplicité et, aux premiers stades de la recherche, elle a suscité un vif intérêt. Cependant on s'est aperçu très vite qu'au cours de ce processus, le temps de conservation de l'énergie était très court et qu'on ne pourrait produire de l'énergie que par une libération brusque d'énergie, équivalente à celle d'une forte explosion de l'ordre de quelques tonnes de TNT. En étudiant cette méthode, les physiciens se sont heurtés pour la première fois au principal obstacle qui s'oppose à la réalisation de l'objectif essentiel. En effet, un plasma placé dans un champ magnétique est habituellement très instable. Cette instabilité dite hydrodynamique présente des formes diverses selon les méthodes employées pour obtenir un plasma à haute température. Elle constitue la «maladie» la plus grave d'un plasma chaud piégé dans un champ magnétique, car les déformations du plasmoïde s'amplifient rapidement et entraînent la destruction complète du confinement magnétique.

Il s'ensuit que l'étude des principaux procédés inscrits au programme de recherche doit passer par un stade où la tâche essentielle consiste à mettre au point des méthodes de stabilisation du plasma.

## PLASMA CONFINE

Dès qu'il est apparu clairement que les systèmes les plus simples du type «à striction rapide» ne pouvaient pas donner de résultats très satisfaisants, les physiciens se sont tournés vers les processus quasi stationnaires en choisissant de préférence les systèmes ouverts. Ces derniers présentaient l'avantage de pouvoir être employés pour l'étude de diverses méthodes de production d'un plasma à haute température. La théorie et l'expérience ont montré qu'il était possible d'éliminer la forte instabilité du plasma dans les pièges du type ouvert en modifiant la configuration du champ magnétique. Les expériences faites en Union soviétique de 1961 à 1963 ont attesté que l'instabilité hydro-magnétique pouvait être totalement supprimée, ce qui a permis de réaliser un confinement stable pour un plasma présentant une température de l'ordre de plusieurs millions de degrés et une densité déterminée.

«On avait ainsi trouvé, a déclaré M. Artsimovitch, une méthode efficace pour éliminer la plus dangereuse forme d'instabilité du plasma».

Personne ne doutait pratiquement plus que les pièges dits ouverts pouvaient répondre aux critères de confinement, et de nombreuses installations

nouvelles fondées sur ce principe ont été récemment construites en Union soviétique, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis d'Amérique. Cependant, ce succès ne signifie pas que l'on a trouvé un moyen direct d'atteindre le but désiré. L'accroissement de la densité du plasma s'accompagne de l'apparition de nouvelles formes d'instabilité. La théorie enseigne toutefois une voie à suivre en vue de neutraliser plusieurs mécanismes d'instabilité à haute fréquence, et les résultats expérimentaux concordent généralement avec ces prévisions.

Dans les pièges actuellement utilisés, la durée de vie des neutrons et des particules rapides est de cinq ordres de grandeur inférieure à celle qui est indispensable pour le fonctionnement d'un réacteur thermonucléaire utilisant un mélange de deutérium et de tritium, mais il ne faut pas oublier qu'il y a quelques années encore, elle était même des dizaines de milliers de fois plus petite qu'à présent. Les calculs ont amené M. Artsimovitch à conclure «que nous avons déjà parcouru la moitié du chemin qui passe par la mise au point de pièges magnétiques ouverts et mène au but final. Certes, nous ignorons encore quelles difficultés nous guettent sur l'autre moitié du parcours, mais néanmoins il ne faut pas sousestimer les réalisations actuelles». Un inconvénient est la perte de particules le long des lignes de force.

Les systèmes magnétiques fermés qui semblent actuellement offrir le plus d'avantages du point de vue des applications techniques futures, appartiennent essentiellement à trois types. L'un est le dispositif torique dans lequel le plasma est maintenu en équilibre au moyen d'un champ magnétique produit par un courant s'écoulant le long d'un anneau de plasma; les installations Tokamak en Union soviétique en sont un exemple. Un autre est caractérisé par un courant de plasma annulaire, semblable à celui du dispositif ZETA au Royaume-Uni, mais l'expérience a montré qu'un faible champ longitudinal ne permet pas d'assurer une bonne stabilisation de la colonne de plasma porteuse de courant. Le troisième est le stellarator, dont la configuration est complexe et dans lequel une colonne de plasma fermée est confinée exclusivement à l'aide d'un champ magnétique externe. L'étude des propriétés du plasma dans les stellarators constitue l'un des éléments les plus importants du programme des Etats-Unis. On a des raisons d'espérer qu'il sera un jour possible de construire un réacteur fondé sur le principe du dispositif Tokamak ou du stellarator.

## TACHE POUR L'AVENIR IMMEDIAT

Les calculs donnent l'impression que, si les conditions nécessaires au fonctionnement des réacteurs thermonucléaires futurs dépassent les possibilités de la technologie moderne, les progrès techniques finiront par permettre la construction d'un réacteur fonctionnant avec un mélange de deutérium et de tritium. Pour le système Tokamak il reste encore à résoudre l'important problème des modes de chauffage. Il semble que les méthodes ci-après soient

particulièrement prometteuses : a) chauffage du plasma par des champs électromagnétiques de haute fréquence ; b) injection de neutres rapides ; c) application de la technique des lasers à rayon infra-rouges de très grande longueur d'onde. La mise au point et l'essai de nouvelles méthodes de chauffage du plasma dans les dispositifs fermés devrait figurer, dans l'avenir immédiat, parmi les préoccupations essentielles des chercheurs.

Les systèmes du type stellarator risquent de concurrencer sérieusement les installations Tokamak en tant que prototypes des réacteurs thermonucléaires, mais leur emploi suscite également de nombreuses difficultés et ils sont très complexes. Cependant les possibilités d'amélioration sont loin d'être épuisées.

En Union soviétique et aux Etats-Unis on a procédé à des expériences sur un système permettant d'obtenir, par compression, un «foyer de plasma» de petit volume ; les principaux résultats obtenus sont sensiblement analogues et le nombre des réactions de fusion semble encourageant. Les énormes difficultés techniques pourraient être surmontées à la longue, mais cette tâche exigera de nombreuses années d'efforts soutenus. D'autres méthodes pour la production d'un plasma à haute température font également l'objet de recherches qui vont s'amplifiant. Celles qui consistent à comprimer le plasma à l'aide d'un champ magnétique externe à croissance rapide pourraient également constituer un point de départ pour la solution pratique du problème essentiel.

Plus de 15 ans d'efforts n'ont pas encore permis de découvrir les clés du tiroir qui récite les plans de la centrale thermonucléaire future, mais les méthodes de production d'un nouveau combustible nucléaire sous l'aspect d'un plasma à haute température sont relativement avancées. Pour hâter l'avènement de cette forme d'énergie, il ne faut pas relâcher l'action entreprise. La physique des plasmas revêt un grand intérêt en soi ; elle est la pierre de touche des sciences modernes de la nature. Son étude contribue à résoudre les problèmes technologiques les plus importants de l'avenir proche et lointain et les atomistes d'avant-garde ne devraient pas ménager leurs efforts dans cette voie.