

VERS LA FUSION NUCLEAIRE

Les perspectives de la fusion nucléaire contrôlée s'annoncent beaucoup moins brillantes qu'il n'avait paru - tout au moins aux yeux du grand public - à l'époque de la première Conférence sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques (Genève 1955); à cette époque, on avait envisagé avec optimisme la possibilité de contrôler les réactions thermonucléaires pour produire de l'énergie. Il n'est plus guère possible actuellement de retrouver l'enthousiasme suscité par la déclaration que M. Homi J. Bhabha (Inde), Président de la Conférence, avait faite sur l'avenir de l'énergie thermonucléaire, et qui fut suivie de l'annonce des recherches sur la fusion nucléaire contrôlée poursuivies activement dans plusieurs pays avancés sur le plan technique.

On reconnut immédiatement l'importance de cette possibilité et nombreux furent ceux qui se livrèrent à des prévisions hardies sur les immenses progrès qui pourraient découler de la production d'énergie à partir des réactions thermonucléaires. "Cette découverte une fois faite", a dit M. Bhabha, dans son allocution d'ouverture, "les problèmes que pose au monde la production d'énergie auront vraiment été résolus à jamais, car le combustible nécessaire sera disponible en quantité presque illimitée puisque l'hydrogène est l'un des éléments des océans." Les commentateurs scientifiques ont tout de suite appelé l'attention du public sur le fait que, pour 6 500 atomes d'hydrogène ordinaire, il y a un atome d'hydrogène lourd (deutérium) et que l'on pourrait même produire de l'hydrogène-3 (tritium) - rare à l'état naturel, mais utile dans les réactions thermonucléaires - en quantités suffisantes en bombardant l'hydrogène lourd avec les neutrons d'un réacteur nucléaire. En d'autres termes, les réserves de combustible paraissent virtuellement inépuisables et le jour semblait proche où un litre d'eau serait plus utile qu'un litre de pétrole.

Lorsqu'à la fin de 1957, la presse publia les premiers rapports sur les résultats qu'avait donnés en Grande-Bretagne l'installation thermonucléaire ZETA, on eut l'impression qu'il ne s'agissait plus d'une simple possibilité théorique et, une fois de plus, l'enthousiasme du public fut à son comble. Cependant, les hommes de science firent de leur mieux pour présenter ces résultats sous leur vrai jour; on s'aperçut bientôt que les rapports destinés au grand public avaient quelque peu exagéré la portée immédiate de ces réalisations. En outre, des expériences analogues furent signalées dans d'autres pays et, à la suite d'une nouvelle évaluation, les travaux accomplis avec le réacteur ZETA furent jugés moins concluants qu'il n'avait semblé de prime abord.

La deuxième Conférence de Genève, qui s'est tenue en 1958, a, pour la première fois, donné l'occasion de procéder à une discussion publique et à une comparaison des résultats obtenus dans différents pays. Au sujet de ce premier échange de renseignements, M. Edward Teller (Etats-Unis) a dit que le parallélisme des progrès accomplis dans les différents pays était remarquable.

D'autre part, les renseignements publiés en 1958 ont fait ressortir combien sont énormes les difficultés d'ordre technique auxquelles se heurte la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée; les problèmes se sont révélés beaucoup plus ardues et le temps qu'il faudra pour les résoudre sera sans doute beaucoup plus long que bien des gens n'avaient été amenés à le croire. Tout en se disant convaincu qu'il était possible de produire de l'énergie thermonucléaire, M. Teller a émis l'opinion que cette production ne serait guère facile à réaliser. De son côté, M. Artsimovitch (Union soviétique) a déclaré: "Sans être pessimistes à l'égard des perspectives de notre travail, nous ne devons pas sous-estimer les obstacles importants qui devront être surmontés pour parvenir à contrôler la fusion nucléaire." Enfin, de l'avis de M. Thonemann (Royaume-Uni), on ne saura s'il est possible de produire directement de l'énergie électrique "en utilisant les éléments légers comme combustibles" qu'au cours de la prochaine décennie et, au cas où il serait possible de le faire, il faudrait dix autres années pour déterminer si la production d'énergie par ce moyen est rentable.

Séance d'ouverture de la Conférence de Salzbourg sur la physique des plasmas et la recherche concernant la fusion nucléaire contrôlée



La Conférence de Salzbourg

Plus de trois ans se sont écoulés depuis que la Conférence de Genève a levé le voile du secret qui entourait la recherche thermonucléaire; ces trois années ont été une période intense d'activité. Depuis quelque temps, les milieux scientifiques se rendaient compte qu'il fallait procéder, sur le plan international, à une évaluation correcte de cette activité; pour répondre à ce besoin, l'Agence internationale de l'énergie atomique a organisé en septembre 1961, à Salzbourg (Autriche), une Conférence sur la physique des plasmas et la recherche concernant la fusion nucléaire contrôlée. Plus de 500 spécialistes envoyés par 29 pays et six organisations internationales ont assisté à cette réunion, qui a duré une semaine; plus de 100 mémoires y ont été présentés et examinés.

Faisant le point de la situation, M. Artsimovitch a dit: "Pour ce qui est de l'état de la question, on ne saurait douter que, dans l'ensemble, des progrès très importants ont été accomplis, si l'on compare la situation actuelle à celle qui avait été exposée à la Conférence de Genève, en 1958. A cette époque, le gros des renseignements scientifiques n'était, au fond, pas autre chose qu'un simple exposé d'idées. Ces idées étaient, pour la plupart, modestement illustrées par quelques données expérimentales très rudimentaires qui n'avaient pas été vérifiées et avaient le plus souvent un caractère préliminaire. En revanche, nous pouvons maintenant trouver, à peu près dans chaque partie du programme thermonucléaire, un grand nombre d'études expérimentales, exécutées avec soin, ainsi que des résultats utiles et dignes de foi dont l'ensemble constitue une base suffisamment sûre et qui permettront d'accélérer considérablement le rythme de la recherche dans l'avenir."

Résumant à son tour la situation actuelle, M. Rosenbluth (Etats-Unis) a déclaré ce qui suit: "S'il est malheureusement vrai que les théoriciens n'ont pas encore expliqué aux expérimentateurs comment construire une installation thermonucléaire, il n'est pas moins vrai que nous nous sommes sérieusement demandé depuis de nombreuses années si pour quelque raison fondamentale la construction d'un réacteur à fusion des plasmas était impossible, et que jusqu'à présent nous n'avons pas trouvé de raison de répondre à cette question par l'affirmative." M. Rosenbluth a ajouté: "Je suis intimement convaincu que l'avenir s'annonce sous un jour très favorable et que dans 20 ans l'humanité aura résolu le problème de la fusion contrôlée, si toutefois elle n'a pas perdu entre-temps la lutte autrement ardue qu'elle mène contre la fusion non contrôlée."

Le problème fondamental

Avant de mentionner en détail les divers sujets qui étaient inscrits à l'ordre du jour de la Conférence de Salzbourg, il sera sans doute utile de rappeler quel est le problème fondamental dans

ce domaine. Le principe de la fusion nucléaire - qui permet notamment d'expliquer comment les astres incandescents libèrent de l'énergie - est connu depuis des années; les quantités d'énergie libérée dans les différentes réactions thermonucléaires ont été déterminées au moyen de la célèbre équation d'Einstein sur l'équivalence de la masse et de l'énergie. Lors de la fusion de deux noyaux atomiques légers en un noyau unique, il se produit généralement une perte de masse importante, une énorme quantité d'énergie se trouvant ainsi libérée.

La fusion ne peut avoir lieu que s'il se produit une collision assez violente entre deux noyaux. Il s'agit de communiquer aux noyaux une énergie suffisante pour leur permettre de surmonter leur répulsion électrique réciproque (tous les noyaux ayant une charge positive), tout en confinant les noyaux dans un espace limité, de manière à augmenter les chances de collision.

Au centre du soleil et de beaucoup d'autres astres, des réactions de fusion se produisent dans des conditions de pression énorme et de température extrêmement élevée. Pour certaines réactions, par exemple entre deux noyaux d'hydrogène lourd ou entre l'hydrogène lourd et le tritium, des conditions quelque peu moins rigoureuses pourraient suffire, mais, même pour ces réactions-là, il faudrait des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés et, en outre, les noyaux accélérés devraient être confinés pendant un temps suffisant pour que des réactions se produisent en assez grand nombre.

Pour ce qui est du problème de l'accélération des noyaux, on a pu atteindre des températures extrêmement élevées en utilisant des décharges électriques très puissantes. Quant au problème du confinement, on a observé un phénomène très intéressant, savoir qu'une décharge électrique puissante crée elle-même un champ magnétique à l'intérieur duquel les particules chargées sont piégées; c'est ce que l'on appelle l'effet de striction. On peut renforcer le confinement en surajoutant des lignes de force supplémentaires au moyen de dispositifs magnétiques auxiliaires. Les particules se trouvent ainsi emprisonnées dans une sorte de bouteille magnétique.

Tout cela peut sembler assez facile, mais la difficulté réside dans le fait que les noyaux surchauffés se comportent d'une façon bien moins complaisante que cet exposé simplifié ne pourrait le laisser croire. Aux températures nécessaires pour mener à bien ces expériences, les atomes des éléments légers considérés sont presque complètement ionisés, c'est-à-dire que les électrons satellites s'évadent des atomes et qu'il ne subsiste plus que des noyaux à charge positive. Ce gaz ionisé, dont les électrons sont libérés, est appelé plasma; on dit parfois qu'il est un quatrième état de la matière.

Il s'agit donc de confiner le plasma chaud pendant un temps suffisamment long pour que les réactions de fusion puissent se déclencher et se

développer. Malheureusement, malgré l'action des champs magnétiques, il se produit dans le plasma des instabilités qui ont pour effet de permettre aux particules piégées de s'échapper. Les recherches actuelles visent en grande partie à expliquer la nature et les causes de ces instabilités.

Comportement du plasma

Bien que dans l'univers la matière existe surtout sous forme de plasma (par exemple dans les étoiles incandescentes) et que même sur notre globe les plasmas ne soient pas rares (dispositifs de décharge dans les gaz et flammes), on connaît actuellement peu de chose sur le comportement des plasmas, en particulier du point de vue dynamique. Une des principales tendances actuelles est donc de faire de la recherche pure, tant théorique qu'expérimentale, dans le domaine de la physique des plasmas, pour mieux connaître les propriétés du plasma très chaud.

La recherche théorique est fondée sur l'approximation dite magnétohydrodynamique, dans laquelle on considère qu'il y a interaction entre le plasma, considéré comme un liquide conducteur, et des champs magnétiques. Dans cette méthode, on ne tient pas compte de la microstructure du plasma qui en réalité est composé de particules énergétiques animées d'un mouvement de giration dans des champs magnétiques locaux. L'interaction de ces particules provoque des effets à peine perceptibles qui peuvent être observés expérimentalement et la théorie des plasmas est sans cesse revue pour essayer d'expliquer les observations.

L'objet d'un grand nombre de travaux expérimentaux est d'arriver à produire des plasmas chauds purs, virtuellement isolés de la matière environnante et stables assez longtemps pour pouvoir faire des observations reproductibles. On peut ainsi vérifier les prévisions de la théorie des plasmas et observer des nuances non prévues des propriétés des plasmas. La configuration du champ magnétique utilisé pour confiner le plasma constitue pour l'expérimentateur une variable importante. Étant donné la faible inertie du plasma et les forces électromagnétiques importantes nécessaires pour retenir les particules énergétiques constituant le plasma, les instabilités inhérentes ont tendance à croître très rapidement. Ces instabilités nuisent énormément aux observations sur le comportement des plasmas et souvent les annihilent.

Pour prévenir ou retarder l'apparition d'instabilités, il faut utiliser des configurations complexes de champs magnétiques pouvant varier dans l'espace et quelquefois dans le temps, ce qui exige une technique électromagnétique extrêmement développée. Ainsi, la physique des plasmas est à l'origine de progrès importants accomplis dans plusieurs domaines techniques, tels que l'accumulation d'énergie électrique, les modèles de bobines magnétiques et la commutation haute tension.

Sir George Thomson, éminent physicien britannique qui a pris part à la Conférence, au cours d'une interview pour la télévision et la radio



Travaux de Salzbourg

Les aspects tant théoriques que pratiques des progrès accomplis ont été examinés en détail à la Conférence de l'AIEA qui s'est tenue à Salzbourg. Les questions suivantes ont notamment été traitées : confinement, stabilité, oscillations et turbulence du plasma ; compression, chauffage et accélération du plasma ; ondes de choc dans le plasma ; interaction des particules et ondes électromagnétiques et des plasmas ; ondes de plasma et rayonnements.

M. Artsimovitch, faisant le point des discussions, a exposé quelques-unes des principales difficultés qu'il faudra surmonter si l'on veut réaliser la fusion nucléaire contrôlée. Il a fait remarquer que le plasma chauffé à très haute température perd très facilement l'énergie accumulée "à la suite de divers mécanismes d'instabilité et sous forme de rayonnements". Il en résulte qu'il n'a pas été possible au cours des expériences faites jusqu'à présent de confiner un plasma dense et chaud pendant plus de quelques centaines de microsecondes (c'est-à-dire moins d'un millième de seconde). De plus, la production d'un plasma d'hydrogène ou de deutérium suffisamment pur est une tâche difficile en elle-même du fait de l'interaction du plasma et des substances présentes sur la surface des parois de la chambre à vide dans laquelle les expériences ont lieu. M. Artsimovitch a également mentionné qu'il était difficile d'observer les propriétés du plasma : "une colonne de plasma cachée par des gaines de métal et des bobines complexes constitue, en raison de son caractère inaccessible et de son extrême sensibilité à tout contact, un sujet de recherche extrêmement délicat".

"Il est particulièrement intéressant de noter", a dit M. Artsimovitch, "que la somme des notions fondamentales de physique n'a pratiquement pas changé. Au cours des trois dernières années, on n'a pas découvert une seule méthode vraiment nouvelle qui permette d'obtenir du plasma à haute

température. Durant la même période, un changement notable s'est produit dans l'orientation des efforts déployés dans les différents domaines de recherche, à l'intérieur du programme d'ensemble. Lorsque les hommes de science ont commencé à s'attaquer au problème des réactions thermonucléaires contrôlées, ils se sont surtout attachés à trouver la méthode la plus simple pour obtenir des températures élevées. Cette méthode se fonde sur l'utilisation des décharges d'impulsions rectilignes de très grande intensité et de courte durée. Ce phénomène est connu sous le nom de striction linéaire rapide. Les efforts consacrés aux Etats-Unis, en Grande-Bretagne et en Union soviétique à l'étude de la striction rapide - recherches qui se sont poursuivies parallèlement - ont permis à tous les intéressés, travaillant en équipe ou individuellement, de se faire, avant même la Conférence de Genève, une idée nette des phénomènes qui se produisent au cours de décharges de cette nature et de découvrir le mécanisme fondamental expliquant la dynamique d'une colonne de plasma. Comme on le sait, ce mécanisme est une accélération du plasma sous l'action de forces électrodynamiques. Bien qu'on ait pu, à la suite d'expériences de striction rectiligne, obtenir des températures du plasma dépassant un million de degrés, on s'est très vite aperçu qu'on ne pouvait guère considérer cette méthode comme un moyen pratique d'obtenir des réactions thermonucléaires intensives à une échelle présentant un intérêt quelconque du point de vue technologique, ou même purement physique."

M. Artsimovitch a ensuite passé en revue diverses autres méthodes et appareils vers lesquels se sont ultérieurement tournés les chercheurs de l'Union soviétique, des Etats-Unis et du Royaume-Uni - notamment les appareils à décharges thêta confinées par striction, les appareils "Zéta", "Alpha", "Sceptre", "Stellarator", "Astron", "Tokamak", "Ogra" et "DCX".

M. Artsimovitch a conclu : "Nul ne saurait à présent contester que les hypothèses initiales, selon lesquelles les portes de la région des températures extrêmement hautes que l'on veut atteindre s'ouvriraient sans bruit au premier souffle de l'énergie créatrice des physiciens, ne sont pas plus fondées que les espoirs du pécheur d'entrer au paradis sans passer par le purgatoire. Et, néanmoins, il ne fait pas de doute que le problème de la fusion nucléaire finira par être résolu. Nous ignorons seulement quelle sera la durée de notre séjour au purgatoire. Avant de quitter le purgatoire, il nous faudra une parfaite connaissance de la technologie du vide, des configurations magnétiques parfait-



Une réunion hors-programme, pendant la Conférence

tement au point, une géométrie des lignes de forces exacte, des conditions bien définies pour les paramètres électriques, et à la main le plasma, paisible et stable, chauffé à haute température et aussi pur que la pensée du théoricien de la physique lorsqu'elle n'est pas souillée au contact des données expérimentales."

M. Rosenbluth a passé en revue les principales théories qui furent avancées durant la conférence et il a souligné le climat d'amitié et de collaboration dans lesquelles renseignements et les idées ont été échangés en toute liberté.

La conférence a tenu dix séances plénières, dont une séance de clôture où furent tirées les conclusions des débats. Les séances ont été présidées par B. Lehnert (Suède), A.E. Buark (Etats-Unis), M.A. Leontovitch (Union soviétique), G. von Gierke (République fédérale d'Allemagne), J.G. Linhart (Italie), E. Nagy (Hongrie), P.C. Thonemann (Royaume-Uni), L. Spitzer (Etats-Unis), L.A. Artsimovitch (Union soviétique) et C. Vendryes (France).

En dehors des débats qui ont eu lieu en séance plénière, la conférence a abordé un certain nombre de questions importantes lors des 14 séances libres qui ont été organisées à la demande des participants. De l'avis général, ces débats libres, qui furent parfois très animés, ont contribué pour une grande part au succès de la conférence.

Les actes de la conférence seront publiés dans trois numéros spéciaux de la revue scientifique de l'AIEA "Fusion nucléaire."