

LES

LASERS

LA FUSION PAR LASER

ALORS que les bombes atomiques font appel à la fission d'atomes lourds (les masses atomiques de l'uranium et du plutonium susceptibles de subir cette fission sont, respectivement, de 235 et de 239), les bombes thermonucléaires utilisent la fusion d'atomes légers : des isotopes d'hydrogène, tels le deutérium et le tritium, dont les masses atomiques sont, respectivement de 2 et 3. La nature des phénomènes qui se déroulent, dans chaque cas, est donc totalement différente, mais le principe grâce auquel ces réactions, nucléaires ou thermonucléaires, conduisent à un dégagement d'énergie, est le même : la somme de la masse des produits formés par une réaction est inférieure à la masse de produits que l'on y fait entrer et, en vertu de l'équation d'Einstein sur l'équivalence entre la masse et l'énergie, c'est à la disparition d'une certaine quantité de matière que l'on doit le dégagement d'énergie.

Une réaction de fission est provoquée par le choc d'un neutron sur un atome d'uranium 235 ou de plutonium 239.

Une réaction de fusion, au contraire, est engendrée par le

rapprochement de deux atomes légers. Mais ces deux atomes exercent l'un sur l'autre une force électrostatique qui tend à les tenir écartés. Pour vaincre cette répulsion, on anime chacun des atomes d'une vitesse suffisamment grande, ce qui s'obtient en les portant à des températures extrêmement élevées : 400 millions de degrés pour la fusion de deux atomes de deutérium, 50 millions de degrés pour la fusion d'un atome de deutérium et d'un atome de tritium.

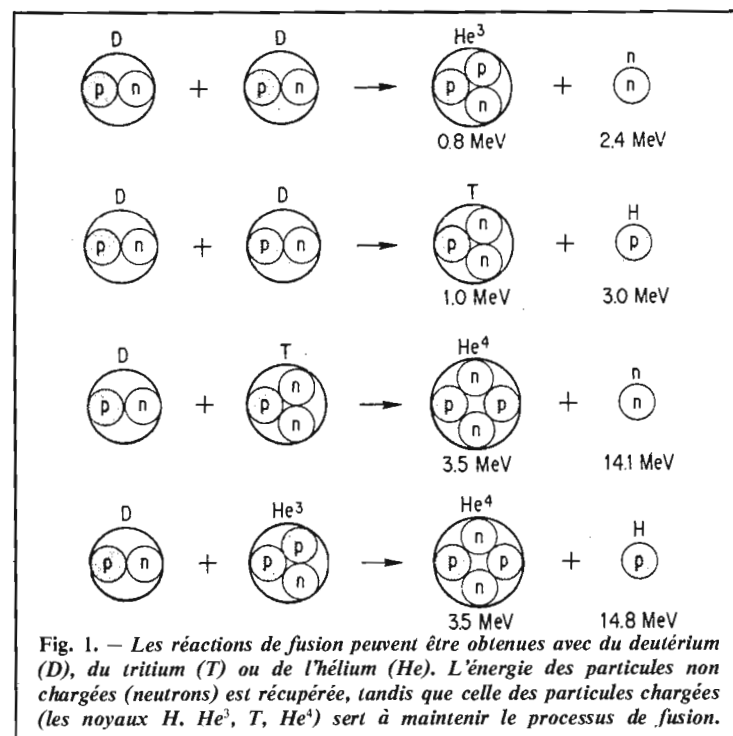
Deux problèmes distincts se sont posés aux physiciens : apprendre à provoquer des réactions de fission ou de fusion, et les comprendre pour être en mesure de les contrôler. Il y a plusieurs dizaines d'années que les physiciens ont réussi à produire des réactions de fission et de fusion utilisées dans les bombes atomiques et thermonucléaires ; en outre, avant même de réaliser la première bombe atomique, ils ont, dès 1942, maîtrisé et domestiqué les réactions de fission.

Ce qui leur échappe encore (mais plus pour longtemps) c'est le contrôle efficace des réactions de fusion.

DE LA BOMBE H AU REACTEUR THERMONUCLEAIRE

Pour atteindre les très hautes températures d'allumage des bombes thermonucléaires, rien

n'interdit d'associer fission et fusion : l'explosion d'une bombe atomique fournit la température nécessaire à l'amorçage de la fusion d'un mélange deutérium-tritium. C'est à cette formule que recourent les Américains pour



constituer leur première bombe thermonucléaire ; l'engin était, en fait, moins une bombe qu'une petite usine, tant était grande sa complexité. Les Soviétiques trouvèrent un perfectionnement sensible, en réalisant un dispositif comprenant, au lieu du mélange deutérium-lithium, du deutérium de lithium-6 ; les neutrons libérés par l'explosion de la bombe atomique provoquent la transmutation du lithium-6 en tritium ; la chaleur libérée par la bombe atomique peut, alors, servir à porter le mélange ainsi formé in-situ, à la température nécessaire pour la fusion.

Dès qu'ils eurent connaissance du procédé soviétique, les Américains l'adoptèrent et, depuis, c'est à perfectionner ce type de bombe que travaillent tous les spécialistes.

La découverte du laser a tout de suite été ressentie comme susceptible d'offrir de nouvelles solutions. Dès 1963, les physiciens soviétiques Nicolas Basov et Oleg Krokine publient les premiers calculs prouvant que la concentration d'un faisceau de lumière cohérente au foyer d'une lentille peut porter un milieu dense à des températures dépassant le million de degrés. La création au moyen de lasers, d'un plasma, quatrième état de la matière, obtenu avec des très hautes énergies, est, désormais, pratique courante. Les premières détections de neutrons, prouvant que des réactions nucléaires, induites par l'énergie du laser, avaient effectivement eu lieu, datent de 1968. A la fin de 1969, au Centre de Limeil, M. Francis Floux a pu mettre indiscutablement en évidence une émission de neutrons en irradiant un bâtonnet de deutérium au moyen d'impulsions laser de quelques nanosecondes. Auparavant, les chercheurs de l'Institut Lebedev, à Moscou, avaient obtenu, au moyen d'impulsions de l'ordre de la picoseconde, des résultats de même nature, quoique moins probants, sur du deutérium de lithium. Depuis de nombreuses expériences semblables ont été réalisées un peu partout, aux Etats-Unis, en Italie, en Allemagne et au Japon.

Les applications militaires de la fusion par laser sont ainsi possibles et, sans nul doute, sont-elles étudiées, dans le plus grand secret, dans les pays occidentaux comme en U.R.S.S., en vue d'une miniaturisation des bombes thermonucléaires.

Les applications civiles font, quant à elles, l'objet d'une bien

plus grande diffusion d'informations. Ces applications concernent, pour l'essentiel, la conversion de l'énergie thermonucléaire en énergie électrique.

LA FUSION THERMONUCLEAIRE

La production d'énergie électrique à des prix compétitifs, sans problème d'approvisionnement en combustible, et sans risque sérieux d'accident nucléaire et de pollution radioactive, tels sont les avantages qu'on peut attendre des réacteurs à fusion thermonucléaire. Ces derniers exploiteront les réactions de fusion entre noyaux atomiques légers, essentiellement des noyaux de deutérium (élément universellement présent dans l'eau, en quantité suffisante), ou des mélanges deutérium-tritium.

Les problèmes physiques et technologiques que pose la construction d'un réacteur à fusion sont toutefois loin d'être résolus. Pour que les réactions de fusion se produisent en nombre suffisant, et que l'énergie électrique récupérée dépasse l'énergie qu'il faut fournir et l'énergie perdue par rayonnements, le combus-

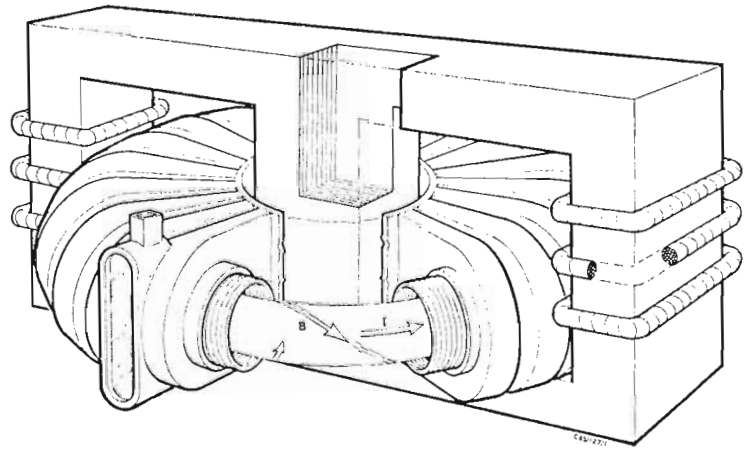


Fig. 2. — Configuration d'un Tokamak (le mot Tokamak vient du russe : To pour toroïdal ; KA pour chambre ; MAK pour magnétique).

tible doit être porté à des températures extrêmement élevées (plusieurs dizaines de millions de degrés !). A de telles températures, le combustible se trouve sous forme d'un gaz ionisé, le plasma, et le confinement du plasma est très difficile à réaliser : l'emploi de parois matérielles est exclu du fait des températures atteintes, et il faut faire appel à des champs électromagnétiques, difficiles à mettre en œuvre.

La création, le chauffage et

le confinement du plasma pendant un délai suffisant, font l'objet de recherches intensives tant aux Etats-Unis, en U.R.S.S. qu'en Europe.

Le théatron, un simple solénoïde, est la configuration de confinement la plus simple ; cependant, le solénoïde a l'inconvénient de perdre le plasma par ses extrémités. La méthode la plus aisée pour éviter ces pertes est de supprimer les extrémités en enroulant, sur lui-même

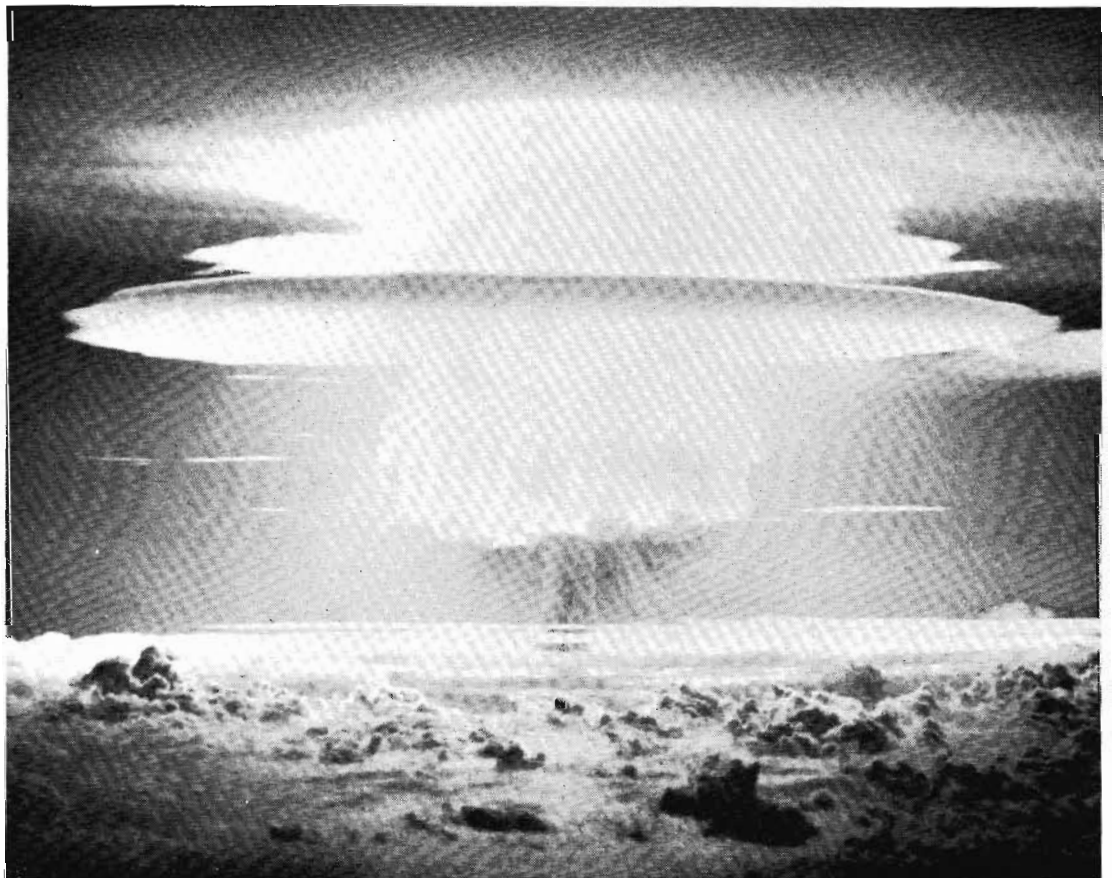


Photo n° 1. — Détonation thermonucléaire : ne pourrait-on pas chauffer le mélange de deutérium et de tritium par un faisceau laser ?

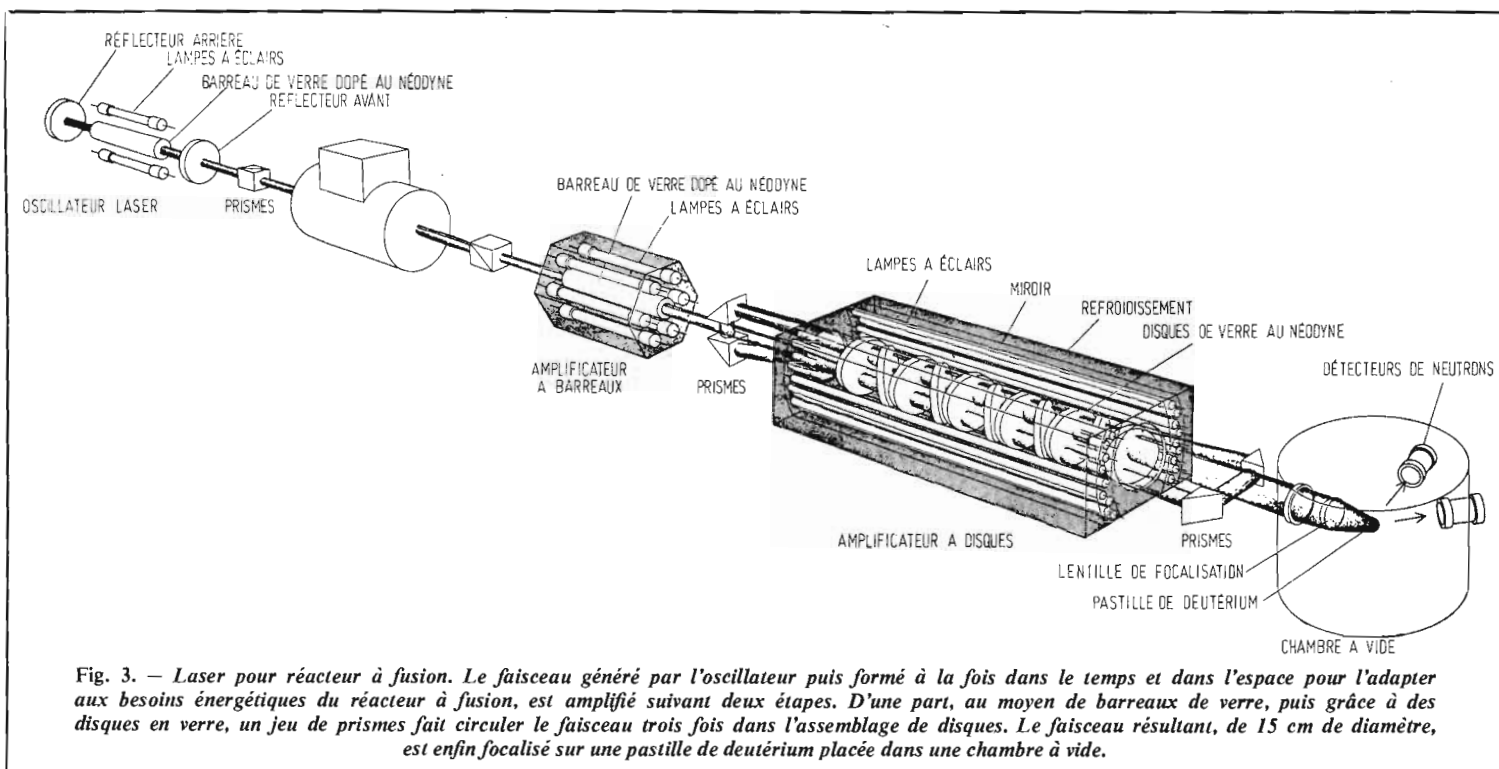


Fig. 3. — Laser pour réacteur à fusion. Le faisceau généré par l'oscillateur puis formé à la fois dans le temps et dans l'espace pour l'adapter aux besoins énergétiques du réacteur à fusion, est amplifié suivant deux étapes. D'une part, au moyen de barreaux de verre, puis grâce à des disques en verre, un jeu de prismes fait circuler le faisceau trois fois dans l'assemblage de disques. Le faisceau résultant, de 15 cm de diamètre, est enfin focalisé sur une pastille de deutérium placée dans une chambre à vide.

le solénoïde. Cette dernière conception a donné naissance à plusieurs configurations toriques.

Tous ces appareils tentent de réunir simultanément un certain nombre de conditions nécessaires à un plasma d'hydrogène totalement ionisé ayant, par exemple, une température de 100 millions de degrés, une densité de 10^{14} particules par cm^3 , et un temps de confinement de l'ordre de la seconde. Les meilleures performances simultanées ont été obtenues par les Soviétiques sur un appareil dénommé Tokamak ; ce type d'appareil à confinement toroïdal du plasma a été retenu par le Commissariat à l'énergie atomique, en collaboration étroite avec l'Euratom. Lorsque l'appareil (appelé TFR) fonctionnera à pleine puissance, il devrait, vraisemblablement, fournir jusqu'en 1975 les meilleures performances mondiales ; après cette date, le relais sera pris par deux nouvelles installations, beaucoup plus importantes, PLT aux Etats-Unis, et T10 en U.R.S.S.

En U.R.S.S., les Tokamak sont développés à l'Institut Kurchatov de Moscou. Aux Etats-Unis, les travaux sur les Tokamak sont exécutés dans plusieurs laboratoires, en particulier ceux de la Gulf General Atomic (« Doublet II »), au Los Alamos Scientific Laboratory (« Scylla »), au Massachusetts Institute of Technology (« Alcator »), à l'Oak Ridge National Laboratory (« Ormak ») et à Austin, dans l'université du Texas.

OU LE LASER APPARAÎT

Des expériences récentes ont démontré que des réactions de fusion pouvaient être initiées en focalisant une impulsion laser intense sur une pastille gelée contenant des isotopes d'hydrogène : le deutérium (H^2) et le tritium (H^3). Les lasers solides, à leur stade actuel de développement, peuvent délivrer des énergies supérieures à 1 000 J pendant moins d'une nanoseconde, sous la forme d'un faisceau parallèle, dont la divergence totale est inférieure au centième de degré d'angle. Un tel laser consiste en un oscillateur (Fig. 3) générant une impulsion de lumière ; celle-ci est dirigée vers une batterie d'amplificateurs laser.

Les atomes d'un laser à barreau de verre dopé au néodyme sont excités par absorption de lumière émise de l'extérieur par des lampes à éclairs ; ceux de ces atomes situés près des lampes ont davantage de probabilité d'être excités que ceux situés à l'intérieur du barreau. Une telle situation devient fortement intolérable pour des barreaux de plus de 5 cm de diamètre ; en outre, les barreaux de grande longueur sont difficiles à refroidir. Une solution consiste à employer des disques amplificateurs en verre au néodyme au lieu de barreaux de verre ; ces disques sont éclairés uniformément sur toute leur surface de base.

Un faisceau laser ainsi amplifié peut, une fois focalisé, transporter une densité de puissance supérieure à 10^{17} W/cm^2 ; le champ électrique, dans le voisinage immédiat du foyer du faisceau atteint des valeurs énormes : 10^{10} V/cm .

L'une des premières applications des lasers en physique thermonucléaire a été la production de plasmas devant être confinés par des champs magnétiques. Cette voie paraissait abandonnée, la plupart des chercheurs semblant s'être orientés vers la génération de plasmas non-confinés au moyen des lasers : on cherche, en effet, actuellement, à réaliser le processus de fusion thermonucléaire contrôlée en chauffant des pastilles d'isotopes d'hydrogène par des lasers, si possible ultraviolets, pendant une nanoseconde ; les plasmas ainsi créés ont des densités d'ions très élevées, environ 10^{26} particules par cm^3 . Aux Etats-Unis, en 1974, près de 30 millions de dollars seront dépensés dans ce domaine.

John Dawson de l'université de Princeton, ainsi que d'autres chercheurs de l'université de Washington et du Lawrence Livermore Laboratory continuent néanmoins à persévérer dans la première voie, et suggèrent de chauffer pendant quelques microsecondes des plasmas de densités comprises entre 10^{17} et 10^{18} particules par cm^3 , avec, par exemple, du laser à gaz carbonique.

Le plasma ainsi réalisé pourrait être confiné dans le champ magnétique d'un long solénoïde durant plusieurs millisecondes. Le montant des dépenses américaines, en 1974, dans ce secteur, sera relativement faible, 500 000 dollars, soit 60 fois moins que dans la voie des plasmas non confinés.

CONFINER UN PLASMA CREE PAR LASER !

Deux conditions doivent être satisfaites pour réaliser un plasma thermonucléaire engendré par laser et confiné dans un champ magnétique. La première d'entre elles consiste à réaliser un système capable de contenir un plasma dont la température soit voisine de 100 millions de degrés Kelvin : pratiquement, cela impose d'avoir des densités de plasma pas trop élevées.

Ensuite, le rayonnement laser doit pouvoir être absorbé efficacement par le plasma. Cette condition requiert une densité de plasma suffisamment élevée. La densité ne doit donc être ni trop élevée, ni trop basse : un plasma de densité égale à 10^{17} particules par centimètre-cube pourrait être confiné dans des champs magnétiques de quelques centaines de kilogauss.

Daniel R. Cohn et Ward Halverson, tous deux responsables d'un programme « plasma par

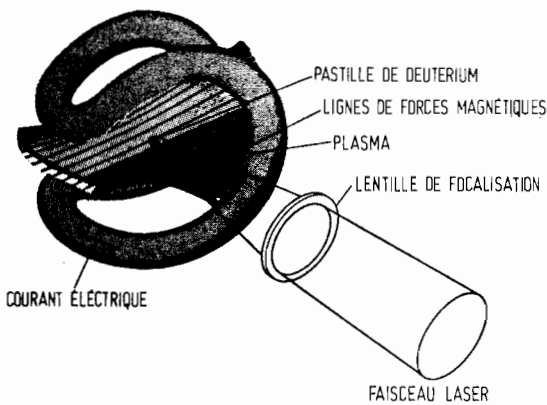


Fig. 4. — A l'université de Rochester en 1968, un laser a été utilisé pour produire un plasma confiné, dont la température était de 10 millions de degrés Kelvin : il contenait 10^{13} ions par centimètre cube.

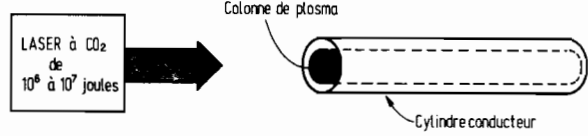


Fig. 5. — Plasma thermonucléaire chauffé par laser, et confiné dans un champ magnétique. Le cylindre conducteur agit en dispositif de conservation du flux magnétique

Tableau I
Les caractéristiques du Tokamak TFR du C.E.A.

- Rayon du tore . . . 98 cm
- Rayon du plasma . 20 cm
- Champ magnétique toroïdal 60 kgG
- Puissance nécessaire pour les bobines du champ magnétique toroïdal 10 MW
- Intensité du courant dans le plasma 400 000 A

laser » au « National Magnet Laboratory » du Massachusetts Institute of Technology, ont proposé un modèle de réacteur à plasma confiné dans lequel un faisceau provenant d'un laser à gaz carbonique se propagerait au sein d'une longue colonne de plasma. Un champ magnétique intense axial contiendrait le plasma (Fig. 5) et réduirait la conduction thermique dans la direction radiale. L'énergie produite au cours des réactions thermonucléaires seraient véhiculée d'abord par des particules « alpha » qui resteraient au sein du plasma ; puis par des neutrons capables de traverser les parois du réacteur et de chauffer un métal liquide agissant comme fluide de travail dans un cycle thermique de génération d'énergie.

Les dimensions du plasma requis pour la production économique de puissance électrique sont déduites de la « condition de Lawson ». Cette condition précise les moyens à mettre en œuvre pour que l'énergie thermonucléaire produite soit supérieure à l'énergie de chauffage du plasma. Pour une température de plasma de cent millions de degrés Kelvin, la condition de Lawson indique que le produit de la densité de particules du plasma (s'exprimant en particules par centimètre-cube), par le temps de confinement (en seconde) et par le rendement de l'installation, doit être supérieur à 3×10^{13} . Le rendement de l'installation inclut le rendement du chauffage du plasma par le laser et la conversion de l'énergie de fusion en électricité.

La densité du plasma dans la colonne est déterminée par les

propriétés du laser et par l'intensité du champ magnétique.

Le temps de confinement dépend des dimensions du plasma. Pour satisfaire à la condition de Lawson, il y a intérêt à réaliser un plasma fin (moins d'un centimètre de diamètre) et très long (quelques centaines de mètres selon Cohn et Halverson). Son temps de confinement serait alors de quelques millisecondes.

Le laser nécessaire devrait avoir une énergie comprise entre

10^6 et 10^7 joules, soit environ 10 fois plus grande que l'énergie requise pour les plasmas non confinés par champ magnétique. Cependant, les impulsions laser peuvent durer une microseconde, contre une nanoseconde dans la technologie des plasmas non confinés. Pratiquement, on pourrait utiliser le laser à gaz carbonique pour générer un plasma confiné par champ magnétique, alors qu'il n'existe pas encore de laser suffisamment puissant pour

être intégré dans l'autre technologie.

Les essais de faisabilité de réacteur à fusion thermonucléaire dans un plasma à confinement magnétique ne sont pas encore réalisés. Avant d'entreprendre de tels essais, il convient de mettre sur pied un programme d'essais sur les plasmas et l'interaction entre un plasma et un faisceau laser :

- faisabilité d'un plasma fin et long, ayant un gradient de densité électronique convenable pour piéger le faisceau laser,
- démonstration de la stabilité d'un tel plasma,
- démonstration de la propagation correcte du faisceau laser le long du plasma.

A l'université de Washington, G.C. Vlases et N.A. Amherd ont entrepris des mesures expérimentales de captation d'un faisceau laser par un plasma, à l'aide d'un laser à gaz carbonique de 4 joules et d'un petit réacteur « theta pinch ». Des expériences devraient être ultérieurement réalisées à l'aide de lasers de plus grande puissance.

D.L. Jassby et M.E. Marhic ont étudié, en 1972, à l'université de Californie (Los Angeles) le chauffage par laser à gaz carbonique. Des travaux similaires sont réalisés à l'Hydro-Quebec Institute of Research par A.G. Englehardt, ainsi qu'au Princeton Plasma Physics Laboratory, par T.K. Chu et L.C. Johnson.

En U.R.S.S., A.M. Prokhorov a aussi débuté, à l'Institut Lebedev un programme expérimental de chauffage de plasma par laser, dans des champs magnétiques.

(à suivre)

Marc FERRETTI.
N° 1429 — Page 171

nouveau

haute fidélité à minuit !..
... et le silence autour de vous !..

casque stéréophonique

Lenco K106

pour moins de 200.000 F

le casque haute fidélité **Lenco K106** vous garantit une écoute musicale à pleine puissance pour vous seul, et le silence autour de vous !..

en vente chez tous les « vrais » spécialistes haute fidélité

liste des revendeurs Lenco sur demande
UNIVERSAL AUDIO 77-10 FEUCHI ROLLES