

FUSION: UN PETIT PAS DE PLUS A FONTENAY-AUX-ROSES

Pour aboutir à l'énergie de fusion, idéale parce qu'inépuisable et non polluante, il faut atteindre une température de 100 millions de degrés. A Fontenay-aux-Roses, une astuce technologique a permis d'arriver à 20 millions environ.

● La fusion nucléaire, qui se poursuit depuis un quart de siècle avec des résultats si minces qu'elle confine au mystique, semble connaître une nouvelle étape. Mobilisant en France (Fontenay-aux-Roses, Grenoble et Limeil) trois équipes de 250 à 300 spécialistes et menée avec le concours partiel de l'Euratom, elle vient quand même de se rapprocher un peu de son but : créer un fragment d'étoile en cage qui donnerait une énergie moins « sale » que la fission. Site du « petit pas » : Fontenay-aux-Roses. Appareil : le Tokamak.

De quoi s'agit-il ? La fusion de noyaux d'éléments légers, d'hydrogène en l'occurrence, se propose de reconstituer ce qui se passe dans la zone centrale du Soleil et des étoiles en général ; à savoir, l'union des protons, le proton étant le noyau de l'élément n° 1 hydrogène, union qui formerait des noyaux plus complexes. C'est donc au sens d'union étroite qu'il faut comprendre le mot « fusion », et non pas, comme on le croit souvent, au sens de liquéfaction.

Pour unir des protons ou des noyaux faits de quelques nucléons, il faut obtenir les conditions de pression et de température qui règnent au sein des étoiles, soit des millions d'atmosphères, soit encore des centaines de millions de degrés. Nous disons bien : soit l'un, soit l'autre, et non pas : l'un *et* l'autre. Certes, les étoiles réalisent simultanément l'un et l'autre, mais sur Terre, dans les laboratoires, on ne peut y parvenir et il se révèle qu'une seule des variables suffit pour aboutir au résultat. Pourquoi ? Parce que l'on veut obliger les noyaux des atomes à s'approcher

suffisamment les uns des autres pour qu'ils s'agglomèrent. Il y a en effet deux forces et deux seulement qui jouent dans le domaine nucléaire et elles sont antagonistes. La première est une vive répulsion qui empêche les protons de trop s'approcher et la seconde est, au contraire, une attraction encore plus forte que la répulsion mais qui ne joue que si les particules sont presque au contact, une sorte de glu qui entoure les protons, provoque leur collage, disons leur « fusion » !

Dans l'état normal des choses seule la répulsion opère. Mais si on provoque une hyperpression on oblige les noyaux à se rapprocher beaucoup plus. Et si on ajoute une très forte agitation, autrement dit une température très élevée, on obligera les noyaux à se rapprocher encore davantage ; donc à surmonter le handicap de la distance. La répulsion sera dépassée et les particules se trouveront dans la zone attractive.

Toute la politique actuelle des laboratoires lancés dans ces recherches, depuis 1950, a consisté à se battre contre les forces répulsives. L'enjeu est mirifique : le fragment réalisé par la fusion, même s'il est infime, une tête d'épingle, suffirait pour libérer l'énergie d'un réacteur nucléaire classique en quelques jours.

Mais voilà ! Comment la réaliser, cette tête d'épingle ? Depuis peu, on prend effectivement de minuscules sphérules, des pastilles d'un millimètre de diamètre sur lesquelles on tire des coups de laser. La quantité d'énergie déversée en un point de la surface est telle qu'une onde de choc est produite par la vaporisation. L'onde

de choc se propage vers l'intérieur et, si on parvient à synchroniser plusieurs faisceaux convergents vers le centre de la pastille de deutérium solidifié, on comprime la zone centrale de cette pastille à des milliers d'atmosphères.

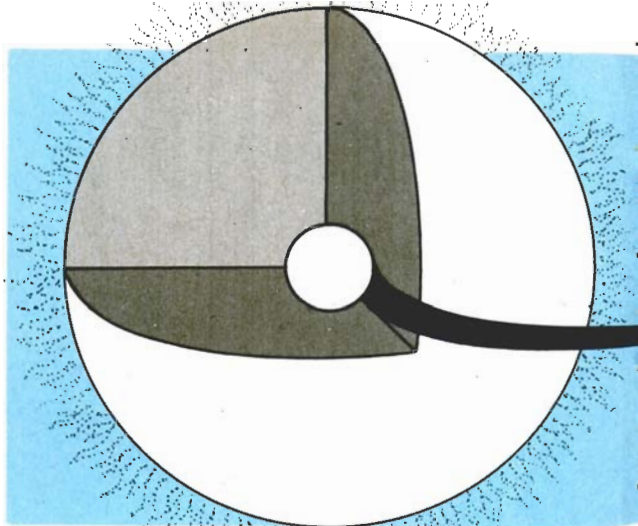
Evidemment, il s'agit d'apporter le plus possible d'énergie à la partie comprimée, pour l'échauffer, provoquer une agitation maximum des particules et, de ce fait, faire apparaître les fusions, avec la libération d'énergie nucléaire qu'elle implique. Ce qu'on veut, c'est que l'énergie dépensée amorce des réactions qui dégageront dix ou cent ou mille fois plus d'énergie.

Le seul laser ne suffit pas à obtenir un tel résultat : l'énergie qu'il apporte comprime bien les pastilles, mais elle est vite dissipée en rayonnement secondaire et en effets d'éjection de la pellicule externe de la pastille, trop tôt démantelée.

Les techniciens ont alors pensé à focaliser sur la pastille, non plus du seul rayonnement laser (de la lumière, autrement dit) mais des faisceaux de particules. C'est très simple comme idée mais très difficile à réaliser en pratique. Le calcul montre qu'en envoyant un pinceau d'ions d'uranium sur une pastille d'un millimètre de rayon on doit, en les faisant pénétrer d'un millimètre de millimètre, atteindre localement un million de milliards de watts, amorçant les réactions thermonucléaires avec un gain de cent sur l'énergie dégagée par rapport à l'énergie dépensée !

Cette idée est transposée aux techniques mises au point pour la fusion dans des gaz raréfiés et ionisés ou plasmas. Plusieurs types d'appareils ont été construits pour parvenir à confiner ces plasmas pendant un temps suffisamment long, par des champs magnétiques, ce qui n'est pas une mince affaire car le plasma se comporte dans son tunnel de confinement comme un dragon et qui plus est, un dragon évanescent. Le plus avancé des appareils est le Tokamak (du russe, Tok, « courant électrique », et mak, pour « magnétisme »). Celui qui a été construit à Fontenay-aux-Roses parvient à confiner pendant un dixième de seconde 10^{13} particules par cm^3 . La température atteinte varie entre 8 et 9 millions de degrés.

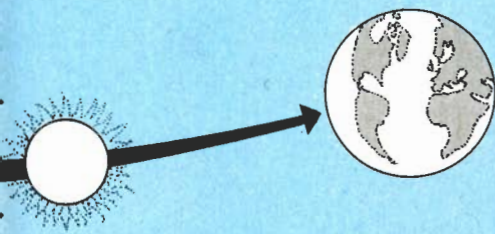
On y applique le principe des pastilles : si, au moment où le courant passe avec l'élévation de température qu'il provoque, on injecte par un trou latéral de 100 cm^2 un faisceau de particules, on ajoute une énergie d'agitation supplémentaire, ce qui élève encore plus la température. En fait, au cours de l'expérience, la température a doublé ; de 9 millions de degrés, elle est montée à 18, rien qu'en envoyant 400 kW de particules neutres perpendiculairement à l'axe du plasma annulaire. Pourquoi des particules neutres ? Parce que, autrement, elles seraient courbées dans leur trajectoire par le champ magnétique de confinement. En fait, ces parti-



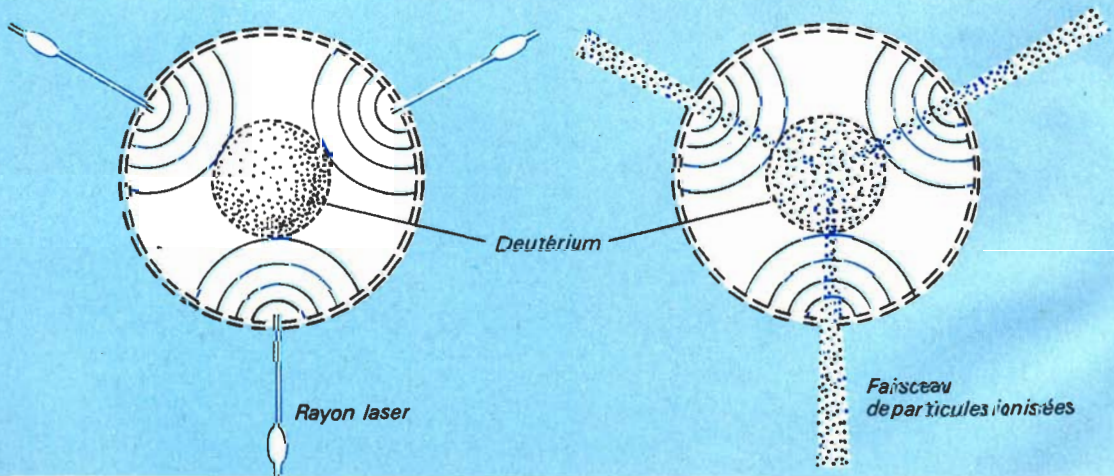
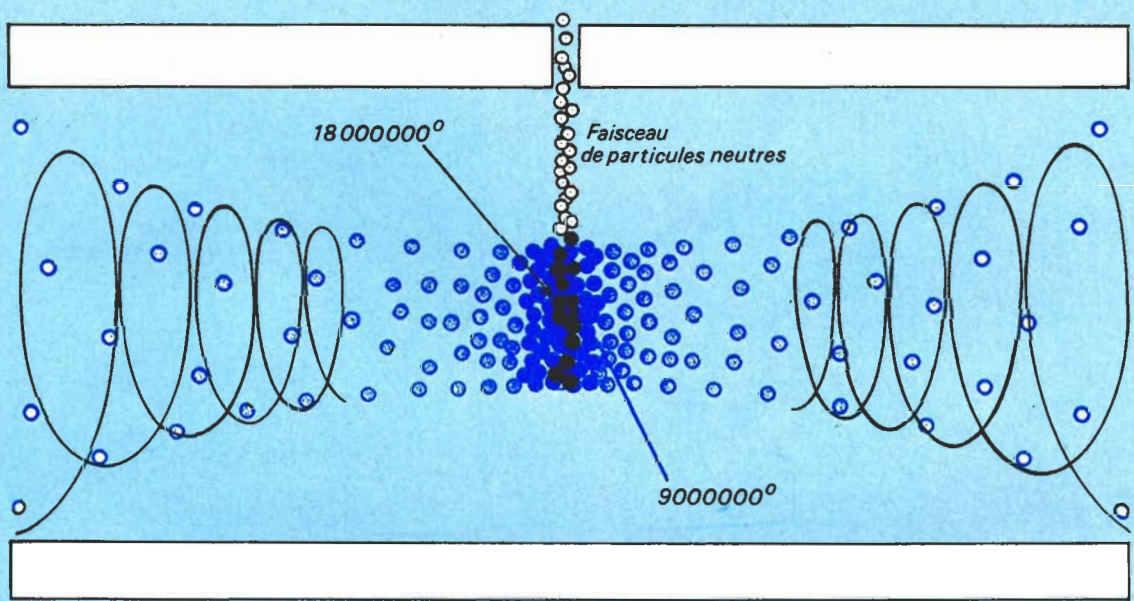
TOKAMAK. La première technique utilisée depuis 1950 pour essayer de monter la température d'un plasma (gaz raréfié et ionisé d'hydrogène et de ses deux isotopes, deutérium et tritium) a été de faire passer des courants électriques très intenses dans le cylindre ou tore qui contient ce gaz. Tout autour, spiralent, un enroulement magnétique crée dans l'anneau central un champ de « confinement » qui maintient les particules électrisées dans une sorte de bouteille aux parois immatérielles. Dans un Tokamak, tel que celui de Fontenay-aux-Roses, on a eu l'idée d'injecter latéralement des bouffées de particules neutres, de l'hydrogène normal, au moment précis où le faisceau central se trouve porté à 9 millions de degrés. Ce jet de particules qui arrivent perpendiculairement sans être déviées par le champ magnétique coercitif (puisqu'elles sont neutres) s'ajoute à l'agitation générale, et multiplie les chocs d'autant. Donc, il y a augmentation de densité et surtout, élévation de la température, qui double et passe ainsi à près de 19 millions de degrés. Cette technique améliorée permettra d'atteindre, estime-t-on, 30 millions de degrés, donc le tiers de ce qui est désiré pour allumer véritablement les réactions H.

LES PASTILLES. Une autre technique, poussée depuis quelques années, tente de reconstituer le milieu du cœur du Soleil, pressions comprises. Le plasma y est remplacé par une pastille liquéfiée de deutérium (hydrogène lourd) d'un diamètre de 1 mm. Plusieurs lasers (on en a représenté trois, à gauche) convergent dessus, chacun d'eux déversant sur la pellicule externe de la pastille une énergie énorme en moins d'un milliardième de seconde. L'onde de choc ainsi produite atteint le centre de la pastille, où le deutérium est comprimé à des millions d'atmosphères. Si les trois faisceaux sont bien synchronisés, on obtient au centre une sphère hypercomprimée, aux valeurs solaires, ce qui suffit à allumer les réactions H. Mais il se perd trop d'énergie à l'extérieur et c'est pourquoi (à droite), l'on pense remplacer les lasers par des faisceaux de particules, ce qui augmentera l'agitation et donc la chaleur.

Dessins L. Delplanque



LE SOLEIL. L'aboutissement de l'aventure nucléaire est, à plus ou moins long terme, la fusion thermonucléaire contrôlée, c'est-à-dire, pour l'Homme, le fait d'imiter Prométhée en dérobant le feu cosmique : celui des étoiles en l'occurrence. Transférer un tout petit morceau du centre du Soleil à la surface de la Terre, dans une chaudière H, tel est le but ultime des recherches activement menées aux USA, en URSS, en France et en Grande-Bretagne. Les étoiles assurent leur débit d'énergie par la transformation dans leur partie centrale (une sphère d'1/10 du rayon total solaire) de l'hydrogène qu'elles contiennent (d'où l'initiale H) en éléments plus complexes. Cette nucléosynthèse exige des conditions de pression considérables qu'il est impossible de reproduire telles qu'elles en laboratoire. Mais il suffit d'atteindre une température de 100 millions de degrés, pour amorcer ces réactions, les protons étant alors doués d'une énergie de mouvement suffisante pour vaincre les forces de répulsion électrique entre eux. Le jour où cette température du centre solaire sera atteinte, dans un appareil, on aura réalisé la première chaudière thermonucléaire.



cules, qui sont de l'hydrogène non atomisé (1 proton et 1 électron) finissent quand même par être ionisées au terme de leur trajectoire. D'où le dégagement d'électrons qui a fait dire aux techniciens du CEA que le Tokamak fonctionne comme un bêta-tron, car il y a dégagement de rayons bêta, c'est-à-dire d'électrons. Quant au processus d'accélération des particules neutres, non « accélérables » par principe, il est possible qu'il se fasse mécaniquement : dans de l'hydrogène poussé dans des tuyaux très minces, à une vitesse voisine de 1 km/s.

Les techniciens comptent beaucoup sur cette nouvelle manière de procéder. Les orifices d'injection vont être agrandis et la puissance envoyée sera doublée. La température obtenue

LE TOKAMAK DE FONTENAY-AUX-ROSES



Ph. J. Biagueaud

● La construction du Tokamak de Fontenay-aux-Roses a été décidée au printemps 1970. Le premier plasma (1 m³ de volume) a été obtenu le 22 mars 1973. Il est alimenté en électricité par un groupe d'une conception originale, délivrant une puissance de 100 MW pendant une seconde toutes les 4 minutes.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Rayon du tore : 98 cm.
- Rayon du plasma : 20 cm.
- Champ magnétique toroïdal : 60 kilogauss.
- Puissance nécessaire pour les bobines du champ magnétique toroïdal : 100 MW.
- Intensité du courant dans le plasma : 400 000 ampères.

dans le faisceau central devrait pouvoir atteindre trente millions de degrés.

Certes, il faudrait cent millions de degrés pour véritablement amorcer les fusions thermonucléaires proprement dites. Mais la voie sera peut-être moins longue de vingt à cent millions qu'elle n'a été de un à vingt, progression lentement effectuée depuis vingt années.

Après une période de doute et de découragement, les spécialistes reprennent espoir et situent l'intervalle 1980-1985 pour l'atteinte tant désirée du but final : le four thermonucléaire, ou, si l'on préfère, le petit morceau d'étoile artificielle.

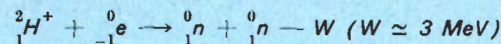
Charles-Noël MARTIN ■

ON AURAIT ATTEINT DES TEMPÉRATURES BEAUCOUP PLUS HAUTES SANS LES PERTES D'ÉNERGIE, PRÉVUES ET EXPLIQUÉES PAR LA SYNERGÉTIQUE

● Il y a un an, nous informions nos lecteurs de certains aspects de la fusion nucléaire considérée sous l'angle de la théorie synergétique du Pr. Vallée, chercheur au C.E.A. de Saclay. Ses conclusions étaient simples : la fusion contrôlée d'un plasma de deutérium confiné par champ magnétique ne pouvait réussir, un processus de fission des noyaux légers, prévu par la synergétique, venant absorber toute l'énergie produite.

Aujourd'hui, les chercheurs annoncent un progrès sous la forme d'une augmentation de la température. Mais cette augmentation est-elle due à la fusion du deutérium ou à la présence d'autres éléments ? C'est là qu'il convient de regarder de près ce que dit la synergétique, et ce que disent les bulletins officiels du C.E.A.

Commençons par la synergétique, qui prévoit que l'action combinée de champs électrique et magnétique colinéaires (c'est le cas dans le tore Tokamak de Fontenay-aux-Roses, dit par abrégé TFR) entraîne la réaction suivante avec le deutérium :



En termes prosaïques, cette équation veut dire : disparition d'électrons, apparition de neutrons

LES FRANÇAIS ONT DEVANÇÉ LES SOVIÉTIQUES ET LES AMÉRICAINS, MAIS TOUT LE MONDE EST LOIN DU COMPTE

● Pour réussir à amorcer et entretenir les réactions de fusion thermonucléaire, il faut obtenir un gaz d'hydrogène totalement ionisé qui ait les trois caractéristiques suivantes :

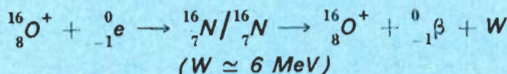
- Température de 100 000 000 degrés ;
- Densité égale ou supérieure à 10¹⁴ ions par cm³ ;
- Temps de confinement de l'ordre de la seconde.

Le plasma d'une densité n doit être maintenu pendant un temps t pour que les réactions s'amorcent et se maintiennent. La relation entre n et t est appelée par les spécialistes « critère de Lawson ». Selon les machines employées, elle varie actuellement entre 10¹⁰ et 10¹³ secondes/cm³ pour des températures de l'ordre de 5 à 20 millions de degrés.

Dans la relation « nt » réside le problème : plus la densité est grande, plus le temps de confinement est court. Si l'accroissement de la densité est difficile à obtenir dans l'état actuel des choses, il faut donc augmenter l'énergie (la température) par unité de volume, ce qui a pour effet de favoriser l'expansion du plasma, donc d'augmenter les difficultés du confine-

lents (occasionnant une radioactivité dangereuse, avec absorption d'énergie).

Et la même théorie dit que, si on ajoute des traces d'oxygène, on a la réaction :



Cette réaction implique : apparition d'un rayonnement β de 6 MeV, donc fonctionnement apparent en bêtatron et augmentation de la température du plasma. Rappelons que le rayonnement β est constitué d'électrons de caractéristiques bien définies (vitesse, niveau d'énergie, etc.), qui sont émis par les corps radioactifs, c'est-à-dire quand il y a transmutation spontanée d'un élément en un autre. On notera dans l'équation la transformation de l'oxygène en azote, et réciproquement, ce qui explique l'émission β . Quant au bêtatron, c'est un accélérateur électromagnétique de particules β , qui n'a rien à voir avec un tore de fusion nucléaire. Voyons maintenant ce que disent les documents officiels. Dans les « Activités Scientifiques et Techniques » 1974 du C.E.A., on lit à propos des expériences de fusion contrôlée à Fontenay : « ... Le spectre du rayonnement de freinage des électrons découplés, mesuré dans une décharge à faible densité, a donné une énergie de 6 MeV. Par ailleurs le courant transporté par ces électrons peut atteindre 15 % du courant principal : TFR fonctionne alors comme un bêtatron de grande intensité ». Par contre,

on ne nous donne pas d'explication à ce phénomène étrange, car voir un tore de fusion fonctionner en bêtatron équivaut à voir une machine à laver fonctionner en radio stéréo. Continuons notre lecture pour noter que « ... le comportement des ions semblait conforme aux théories néo-classiques, mais que par contre les électrons devraient subir des pertes d'énergie anormalement élevées qui peuvent être attribuées à la présence des impuretés ou à des phénomènes de turbulence ».

Pour savoir ce que sont ces impuretés, on prend le Bulletin d'Informations du CEA d'avril 75 n° 202, et on lit : « ... L'impureté dont la densité domine est l'oxygène ». Poursuivant, on y lit encore que les électrons sont accélérés dans le champ électrique induit jusqu'à des énergies supérieures à 5 MeV, ce qui est énorme. Mais quelques paragraphes plus loin, il est dit que ces électrons subissent des pertes d'énergie anormalement grandes. Il devient donc difficile de savoir si les électrons gagnent de l'énergie ou en perdent, mais de toutes façons ils posent un difficile problème puisque le bulletin conclut : « ... la question se pose de savoir quelles sont les conséquences des pertes anormales pour la poursuite du programme. »

En fait, il serait peut-être d'abord nécessaire d'expliquer ces pertes anormales, ce que fait la théorie synergétique car on notera la concordance entre les réactions prévues et les faits observés lors des expériences. □

ment.

Jusqu'à présent, aucune équipe scientifique au monde n'a réussi à réunir les 3 conditions citées plus haut. Si cela avait été fait, on aurait maîtrisé l'énergie de fusion thermonucléaire. Néanmoins, chacune des équipes nationales, avec des techniques totalement différentes, se rapproche d'année en année des conditions indiquées plus haut.

En ce qui concerne la température, le résultat que la France vient d'obtenir avec son Tokamak est celui qu'escamotent les Soviétiques avec leur installation T10 qui vient juste d'entrer en fonctionnement. Ils viennent d'ailleurs d'obtenir sur leur machine un flux de neutrons supérieur d'environ 100 fois au niveau enregistré sur les Tokamaks précédents. Aux USA, un résultat analogue à celui des Français ne sera obtenu vraisemblablement qu'à la fin de cette année ou au début de l'autre, avec le Tokamak PLT de Princeton. Des plus gros Tokamaks possédant respectivement des volumes de 60 m³ (JT60 japonais et TFTR américain), 200 m³ (JET européen) et 400 m³ (T20 soviétique) seront opérationnels à partir de 1980-1985. Ils devront permettre d'obtenir des températures plus élevées, et de meilleurs temps de confinement.

Une autre voie est ouverte par les installations laser. Un facteur « nt » et une température comparable à celle des Tokamak, ont été obtenus

par des installations laser (voir texte) pour la première fois par la firme privée américaine KMS. Le temps de confinement du plasma a été cependant bien plus petit qu'avec les Tokamaks de l'ordre de 240 picosecondes. Cependant, les énergies les plus fortes, donc les compressions mécaniques permettant les densités du plasma les plus élevées, sont obtenues grâce à des lasers à gaz carbonique à Los Alamos et au Centre de Recherche pour la Défense à Valcartier, au Québec.

Les lasers dits CO²-TEA (gaz carbonique-traverse excitation et pression atmosphérique) mis au point par un chercheur canadien, le Dr J. Beaulieu, sont parmi les plus puissants du monde. Ils délivrent une énergie de 400 joules pendant 1,5 nanoseconde.

Mais l'énergie produite par ces lasers, même disposés en chaîne, n'est pas encore suffisante : il faudrait atteindre une énergie de l'ordre de quelques kilojoules pendant au moins plusieurs centaines de picosecondes. Les lasers au CO₂ ouvrent une voie intéressante dans laquelle travaillent les Canadiens et les spécialistes du CEA. Ce n'est pas la seule voie ouverte avec les Tokamaks. Les chercheurs travaillent sur les installations ouvertes de confinement par champ magnétique, ainsi que des installations de confinement de plasma par concentration de faisceaux d'électrons ou d'ions. J.-R.G. □