



HAL
open science

La fusion industrielle est-elle pour demain ?

G. Vendryes

► **To cite this version:**

G. Vendryes. La fusion industrielle est-elle pour demain ?. Journal de Physique et le Radium, 1958, 19 (8-9), pp.724-731. 10.1051/jphysrad:01958001908-9072400 . jpa-00235920

HAL Id: jpa-00235920

<https://hal.science/jpa-00235920>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA FUSION INDUSTRIELLE EST-ELLE POUR DEMAIN ?

Par G. VENDRYES,

Centre d'études nucléaires du C. E. A., Saclay.

Résumé. — Cet article reproduit une conférence donnée à Paris, le 17 avril 1958, dans le cadre de l'exposition de la Société française de Physique. Il expose les principes fondamentaux sur lesquels repose la possibilité de produire de l'énergie par fusion et développe plus en détail les perspectives offertes par l'utilisation du phénomène de striction.

Abstract. — This paper reproduces a lecture given in Paris, on April 17th 1958, during the French Physical Society Exhibition. Therein are developed the basic principles which underlie the possible use of fusion for producing power. The approach making use of the pinch effect is discussed in some detail.

Depuis quelques années, un intérêt considérable est accordé aux perspectives offertes par l'énergie thermonucléaire. Si cette conquête s'impose à nous pour d'impérieuses raisons pratiques, elle constitue en même temps une passionnante aventure scientifique et ouvre un nouveau chapitre de la physique que M. Perrin qualifiait récemment d'astrophysique expérimentale. Il s'agit bien, en effet, de reconstituer sur un petit coin de notre terre des conditions analogues à celles qui règnent dans les étoiles et d'adapter à notre usage les sources où elles puisent l'énergie qu'elles rayonnent.

Les possibilités du deutérium. — Dans cette entreprise ambitieuse, le seul avantage dont nous disposons est d'avoir, dans une certaine mesure, le choix des armes. Pour toute une série de raisons, notre combustible sera l'hydrogène ou plus précisément un isotope rare de l'hydrogène, le deutérium. Les réactions nucléaires auxquelles nous ferons appel sont indiquées sur le tableau I ; elles sont connues depuis un quart de siècle.

Cette série de réactions représente finalement la formation d'un noyau d'hélium 4 par fusion de deux noyaux de deutérium ; cette construction s'opère en plusieurs temps et donne naissance à des noyaux intermédiaires.

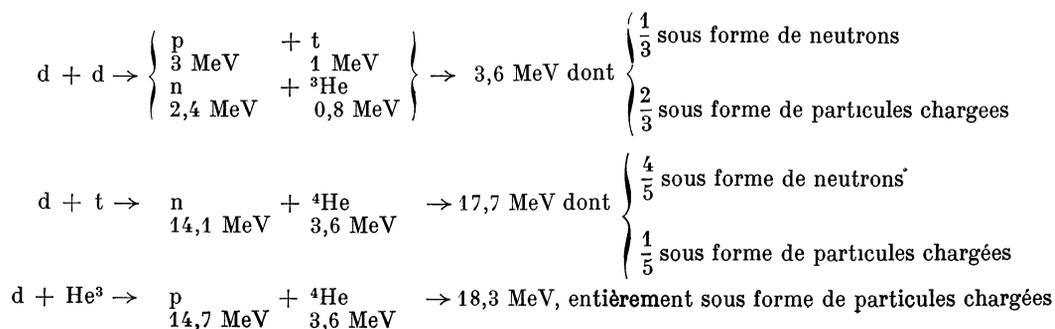
Dans cette filiation, la réaction fondamentale est la première, qui présente l'avantage d'utiliser uniquement un élément stable, existant dans la nature. Elle peut s'opérer selon deux voies différentes, dont les probabilités sont comparables.

Les deux autres réactions, qui utilisent les sous-produits de la première — d'une façon grossièrement analogue à ce qui se passe dans une pile à fission, où l'on brûle le plutonium après l'avoir formé — sont très importantes aussi.

La réaction $d + t$ doit son intérêt à sa section efficace exceptionnellement élevée, qui la rend plus aisée à produire que la réaction du deutérium sur lui-même. Elle peut donc, dans une première phase, faciliter le démarrage d'une production d'énergie de fusion à partir de tritium produit artificiellement. De toute façon, lorsqu'on saura

TABLEAU I

REACTIONS DE FUSION



utiliser la réaction $d + d$, on brûlera le tritium au fur et à mesure de sa production et bénéficiera d'un appoint énergétique très important.

Quant à la dernière réaction $d + {}^3\text{He}$, elle présente l'inconvénient d'une section efficace plus faible, due à la double charge du noyau d'hélium, mais par contre a le gros intérêt de dégager une énergie très élevée, et ce entièrement sous forme de particules chargées qui peuvent donc être conservées dans le milieu réactionnel et contribuer à l'entretien de son énergie interne.

La consommation intégrale d'un kilogramme de deutérium par la réaction $d + d$ seule dégagerait 24 millions de kWh, production qui se trouve être équivalente à ce que donnerait la consommation intégrale d'un kilogramme d'uranium ou de plutonium par fission, et qui est environ 3 millions de fois supérieure à l'énergie fournie par la combustion complète d'un kilogramme de bon charbon.

Si nous tenons compte de la réutilisation du tritium formé, ce qui est légitime, un kilogramme de deutérium peut donner 67 millions de kWh et une centaine si le ${}^3\text{He}$ est également consommé.

On peut difficilement rêver d'une meilleure source d'énergie. Si nous songeons à l'immense réservoir que constituent les océans, nous trouvons là de quoi assurer les besoins de la planète pendant des millions d'années.

Conditions à satisfaire. — Actuellement, la seule possibilité qui soit sérieusement envisagée pour libérer à grande échelle cette énergie de fusion consiste à porter le gaz deutérium à une température très élevée, de telle sorte que l'énergie d'agitation thermique des noyaux devienne d'un ordre de grandeur suffisant pour leur permettre, lors de leurs rencontres, de surmonter les forces de répulsion électrostatique et de donner lieu aux réactions nucléaires attendues.

Divers procédés, certains fort subtils, ont été proposés qui auraient éventuellement permis d'utiliser industriellement les réactions de fusion à la température ordinaire. Je mentionnerai seulement l'idée, émise voilà quelque temps, de provoquer des réactions en chaîne de fusion en utilisant comme catalyseurs, comme véhicules de la réaction, des mésons μ négatifs de même que les neutrons propagent les réactions de fission dans une pile à uranium. Les espoirs un moment éveillés par cette fusion froide se sont avérés non fondés, non pas tant pour des raisons de principe, que pour des questions d'ordre de grandeur. D'autres formules, reposant par exemple sur l'emploi d'accélérateurs, se heurtent à des objections semblables.

Sans qu'on puisse totalement exclure l'existence d'un raccourci, il est clair actuellement que le chemin aboutissant à la domestication de l'énergie de fusion nous emmène d'abord vers la quête des températures très élevées.

Pour fixer les idées, nous allons partir d'une

certaine quantité de deutérium pur à la température ordinaire et à basse pression, égale par exemple au dix millième de la pression atmosphérique — ce qui correspond à un nombre de noyaux de deutérium de l'ordre de $5 \cdot 10^{15}$ par cm^3 — et nous supposons que nous chauffons ce gaz à volume constant sans nous soucier pour le moment des problèmes posés par cette opération. Quelle sera la succession des phénomènes observés ?

Vers 5 000 °C, les molécules vont être disloquées en atomes, puis bien avant que le cap des 100 000 °C soit atteint, les atomes de deutérium vont être dissociés en leurs constituants, noyaux et électrons, le gaz complètement ionisé constitue alors ce qu'il est convenu d'appeler un plasma. Nous continuons à chauffer. C'est seulement une fois que le million de degrés est dépassé que des appareils très sensibles peuvent permettre de détecter les rares neutrons attestant que des réactions de fusion commencent à se produire au cours de collisions exceptionnelles entre noyaux de deutérium. Lorsque la température augmente, le taux de réactions thermonucléaires croît très vite, la puissance dégagée aussi. A 100 millions de degrés, elle atteint 10 watts par cm^3 , tandis que la pression exercée par le plasma dépasse 100 atmosphères. Nous ne sommes toutefois pas encore arrivés au but car, dans de telles conditions, l'énergie qui s'échappe du plasma sous forme de rayonnement électromagnétique, dû surtout au freinage des électrons dans le champ des noyaux, excède encore l'énergie produite par les réactions de fusion. Il s'ensuit qu'à moins d'un apport continu d'énergie extérieure, la température du milieu ne peut que décroître et le dégagement d'énergie par fusion s'éteindre progressivement.

C'est seulement lorsque la température atteint 400 millions de degrés que l'énergie produite par fusion devient supérieure à celle qui est rayonnée ; à condition qu'aucune autre cause de pertes n'intervienne, le dégagement d'énergie peut alors s'entretenir de lui-même, comme dans une combustion chimique ordinaire. Il est même vraisemblable qu'un effort supplémentaire sera nécessaire pour compenser d'autres causes de pertes, par conduction notamment, et que la température de fonctionnement devra se tenir plutôt aux environs du milliard de degrés, auquel cas la contribution de la réaction $d + {}^3\text{He}$ deviendra essentielle. Dans ces dernières conditions, la pression de notre plasma atteindra 1 000 atmosphères et la puissance dégagée 500 watts par cm^3 .

Une analyse de ce genre montre que les principaux paramètres physiques de fonctionnement d'un milieu thermonucléaire au deutérium pratiquement utilisable ne peuvent s'écarter d'une gamme de valeurs relativement étroite. Comme nous venons de le voir, la température à atteindre doit dépasser un seuil critique de quelques centaines de millions de degrés. Quant à la densité du milieu,

nous ne pouvons la prendre très différente de celle du précédent exemple (soit 10^{15} à 10^{16} noyaux par cm^3) sans tomber dans des ordres de grandeur inadmissibles pour la puissance produite ou la pression à contrebalancer.

Dans ces conditions, le temps nécessaire à la consommation d'une fraction notable du deutérium présent est de l'ordre d'une dizaine de secondes. Il n'est pas inutile de signaler que la trajectoire par-

courue pendant ce temps dans le plasma par un noyau individuel a une longueur comparable à celle de la circonférence terrestre.

Dans le cas où nous utiliserions comme combustible un mélange à parts égales de deutérium et de tritium, les conditions seraient un peu moins sévères. La température critique est alors seulement de 50 millions de degrés. À titre indicatif, un plasma contenant $5 \cdot 10^{14}$ noyaux de deutérium et $5 \cdot 10^{14}$ noyaux de tritium par cm^3 , porté à 400 millions de degrés, exercerait une pression de 100 atmosphères, dégagerait une puissance de 500 watts par cm^3 et se consumerait en un temps de l'ordre de la seconde.

Pour atteindre les objectifs qui viennent d'être précisés, deux problèmes fondamentaux sont à résoudre. Il faut trouver les moyens de porter le plasma aux hautes températures requises, il faut aussi le confiner, c'est-à-dire l'isoler des parois du récipient qui l'enferme. Ces deux problèmes sont intimement liés, car on doit les résoudre simultanément, et en faisant appel aux mêmes propriétés physiques du plasma. Pour la clarté de la présentation, il est bon de les évoquer successivement.

Le problème du chauffage. — Pour porter à un milliard de degrés un litre de deutérium se trouvant initialement à la température ordinaire, sous une pression égale au dix millième de la pression atmosphérique, il faut lui fournir une énergie équivalente à la quantité de chaleur qui est nécessaire pour chauffer de 50°C un litre d'eau. Une telle énergie est sans doute modeste, en valeur absolue ; elle représente néanmoins une fraction non négligeable (quelques pour cent) de l'énergie maximum qu'il serait possible d'extraire par réactions de fusion du plasma chaud, dans le cas extrême où l'on parviendrait à consommer ainsi l'intégralité du deutérium et de ses dérivés, tritium et hélium 3.

En réalité, il nous faudra mettre en œuvre une énergie nettement plus importante afin de compenser, pendant tout le temps que durera le chauffage, les pertes — principalement les pertes par rayonnement —. Nous avons, en quelque sorte, à remplir à ras bord un tonneau qui fuit. On conçoit que, pour y parvenir, il faille opérer aussi vite que possible. Dans le cas de notre plasma, cela signifie que nous devons utiliser pour le chauffer une puissance très grande. Pour traverser la région située en dessous de $100\,000^\circ\text{C}$, où le gaz incomplètement ionisé rayonne énormément et présente une capacité calorifique élevée, la puissance à mettre en œuvre devra même atteindre pendant de brefs instants, des valeurs considérables.

En soi, le problème du chauffage ne devrait pas soulever de difficultés d'ordre fondamental. On sait que la chaleur est la forme la moins noble de

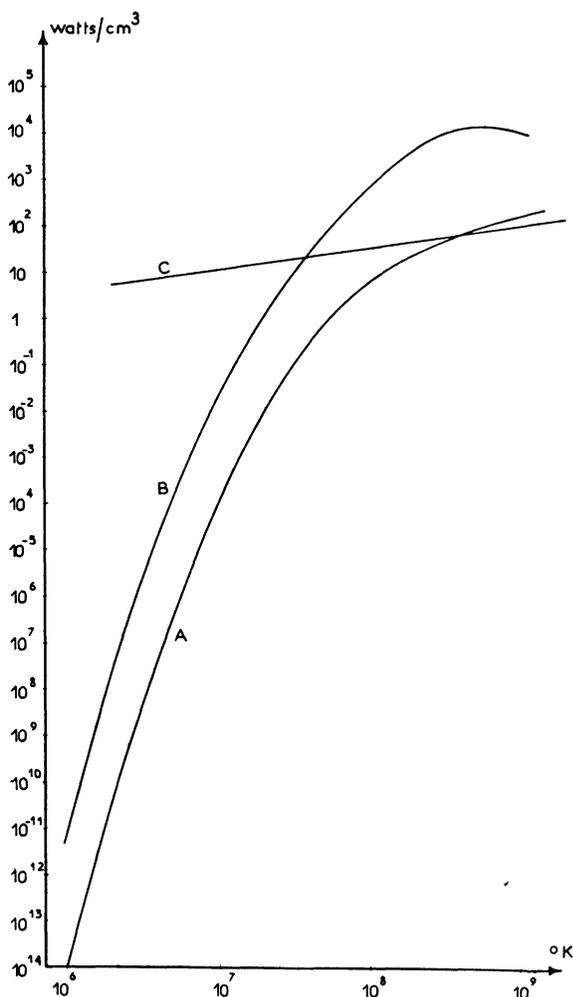


FIG. 1. — La courbe A représente la puissance produite par fusion en fonction de la température dans un plasma constitué uniquement de deutérium et contenant $5 \cdot 10^{15}$ noyaux par cm^3 .

La courbe B représente la même grandeur dans le cas d'un plasma contenant par cm^3 $2,5 \cdot 10^{15}$ noyaux de deutérium et $2,5 \cdot 10^{15}$ noyaux de tritium.

Enfin la courbe C représente la puissance qui s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique d'un plasma hydrogène complètement ionisé contenant $5 \cdot 10^{15}$ noyaux par cm^3 .

Les ordonnées de ces courbes sont toutes trois proportionnelles au carré de la densité des noyaux dans le plasma, aussi les températures critiques pour lesquelles les courbes A et B coupent la courbe C sont-elles indépendantes de cette densité.

l'énergie, celle en laquelle toutes les autres ont une tendance spontanée à se transformer, la difficulté à laquelle on se heurte dans la plupart des cas, étant justement d'éviter ou de limiter ces transformations. Ici nous nous trouvons au contraire avoir à les favoriser.

L'un des principaux parmi les processus irréversibles est l'effet Joule et c'est effectivement lui qu'on met à profit dans les dispositifs actuellement étudiés, en faisant circuler dans le plasma un courant électrique intense. Toutefois, la résistivité d'un plasma hydrogéné complètement ionisé décroît selon une loi en $T^{-3/2}$ lorsque la température augmente, devenant inférieure à celle du cuivre au delà de 30 millions de degrés. De plus, ce sont essentiellement les électrons qui transportent le courant et qui transfèrent ensuite aux ions, par des chocs, l'énergie que le champ électrique leur a communiquée. Or ce sont les ions que nous désirons chauffer ; nous sommes donc là dans des conditions relativement défavorables et qui le deviennent de plus en plus au fur et à mesure que la température s'élève et que le transfert d'énergie des électrons aux ions se ralentit sans cesse. En conclusion, l'effet Joule sera surtout efficace pendant les premières phases du chauffage, très intéressant notamment pour passer le cap des 100 000 °C.

Un autre procédé bien connu pour élever la température d'un gaz consiste à le comprimer. Il est également utilisable pour chauffer un plasma, la compression étant alors provoquée par les efforts électro-dynamiques s'exerçant sur les courants présents dans le plasma. Si ces compressions sont assez brutales, elles donnent naissance à de véritables ondes de choc d'autant plus efficaces pour le but que nous poursuivons qu'elles augmentent l'énergie cinétique des ions de préférence à celle des électrons. L'application répétée de compressions irréversibles, en cumulant leurs effets, offre ainsi un puissant moyen de chauffage.

Il en est d'autres encore susceptibles de prendre le relais de l'effet Joule aux températures élevées, et qui reposent, sous une forme ou une autre, sur la transformation d'énergie électromagnétique en chaleur dans le plasma.

Il est toutefois un dernier procédé que je voudrais mentionner car il est très différent de tous les autres et peut éventuellement apporter une solution nouvelle au problème du chauffage. Il consiste à alimenter directement le milieu réactionnel en noyaux et électrons accélérés sous quelques dizaines de milliers de volts, issus de sources d'ions à forte intensité. Le plasma chaud se constitue par simple brassage de ces particules, au cours duquel leur énergie moyenne demeure inchangée. La formule est élégante mais les intensités requises dépassent ce que peuvent donner les sources d'ions actuelles.

Le problème du confinement. — L'autre problème fondamental que nous avons à résoudre est celui du confinement. Comment inventer un récipient qui contienne le plasma à des pressions et à des températures aussi élevées ? Il est bien évident qu'aucune paroi matérielle ne peut supporter des températures dépassant quelques centaines de degrés. Il faut donc trouver les moyens d'établir un gradient de températures considérable entre le cœur du plasma et la surface interne du récipient qui le renferme.

Une formule possible, sur le papier, consisterait à construire une grande sphère métallique, à la remplir entièrement de gaz, à en porter le centre aux températures nécessaires à la fusion et à y établir un régime tel que l'énergie dégagée dans la région centrale soit évacuée principalement par conduction à travers des couches gazeuses de plus en plus froides jusqu'à la paroi maintenue à la température ordinaire. Le calcul d'un tel engin méritait d'être effectué, mais ses conclusions en condamnent la réalisation pratique, même dans le cas estimé le plus favorable où l'on envisage d'utiliser comme combustible un mélange de deutérium-tritium sous une pression de 1 000 atmosphères. La conductibilité thermique extrêmement grande du plasma chaud obligerait en effet à donner à cette étoile miniature un rayon de 1 kilomètre tandis que la puissance produite dépasserait 10^{17} watts.

Il faut donc admettre que dans tout appareil réalisable à l'échelle terrestre, le plasma sera pratiquement isotherme, et devra être strictement maintenu hors de tout contact avec les parois du récipient. Il y a lieu de préciser que cette exigence vise beaucoup plus à protéger le plasma que la paroi. En cas de contact entre eux, la paroi s'échaufferait modérément, alors que le refroidissement du plasma serait considérable, à cause des pertes par conduction et également par suite de la pollution du gaz par des particules de numéro atomique élevé arrachées à la paroi.

Pour réaliser l'isolement total du plasma dans un récipient de dimensions raisonnables, il semble bien que nous ne disposions que d'un seul moyen. Il consiste à utiliser le fait que le gaz est complètement ionisé et que ses particules constitutives sont donc sensibles à l'action des forces électromagnétiques. Dans un champ magnétique en particulier, elles décrivent des trajectoires enroulées en hélice le long des lignes de force et peuvent ainsi être maintenues dans une région finie de l'espace. On cherchera donc à enfermer le plasma au moyen d'une barrière immatérielle en remplissant l'espace qui l'entoure avec du champ magnétique. Supposons le cas idéal représenté sur la figure 2. où nous aurions du champ à l'extérieur et pas de champ à l'intérieur du plasma ; les particules emprisonnées viennent rebondir à la limite du champ magnétique. Les déplacements de ces charges positives et négatives

tives, au moment où elles sont courbées par le champ à la frontière du plasma, donnent naissance à un courant électrique superficiel. On peut également, d'un point de vue macroscopique, se repré-

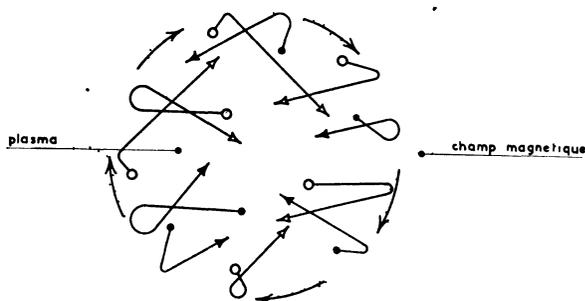


FIG. 2. — Schéma du confinement d'un plasma complètement ionisé par un champ magnétique qui l'entoure ; les flèches représentent le courant électrique superficiel dû aux particules courbées à la lisière du champ magnétique.

senter que le confinement du plasma est dû à la force exercée sur ce courant par le champ extérieur, et dirigée vers l'intérieur. La pression du gaz enfermé est ainsi contrebalancée par une pression magnétique antagoniste, proportionnelle au carré du champ. Pour équilibrer une pression de 300 atmosphères, un champ de 100 000 Gauss est nécessaire. Ce sont évidemment là des valeurs considérables, mais qui ne semblent pas inaccessibles.

Pour réaliser une telle bouteille magnétique, diverses configurations spatiales de champs magnétiques peuvent être imaginées, dues à des courants électriques circulant dans le plasma ou dans des conducteurs extérieurs.

Finalement, on constate que les deux objectifs poursuivis, chauffage et confinement, peuvent au moins en principe être atteints en faisant appel à des méthodes de même nature.

Le phénomène de striction. — L'un des procédés actuellement envisagés utilise ce qu'on appelle le « pinch effect » dans les pays anglo-saxons, et que nous nommons le phénomène de striction. Il s'agit là d'un procédé parmi d'autres, et pas nécessairement le meilleur bien que de grands efforts lui soient aujourd'hui consacrés. Si je m'y arrête, c'est qu'il est le seul sur lequel ait été levé le secret qui malheureusement entoure encore la plupart des travaux sur la fusion thermonucléaire.

Ce phénomène, connu depuis longtemps, est représenté schématiquement sur la figure 3. On le reproduit aisément au laboratoire en déchargeant une batterie de condensateurs dans une chambre remplie de gaz sous basse pression, entre électrodes. Le courant qui circule dans le gaz, paral-

lèlement à l'axe de la chambre, crée un champ magnétique azimuthal dont l'effet, sur le courant qui le produit, est une force dirigée vers l'axe. Si le courant est assez intense, — dépassant dans un

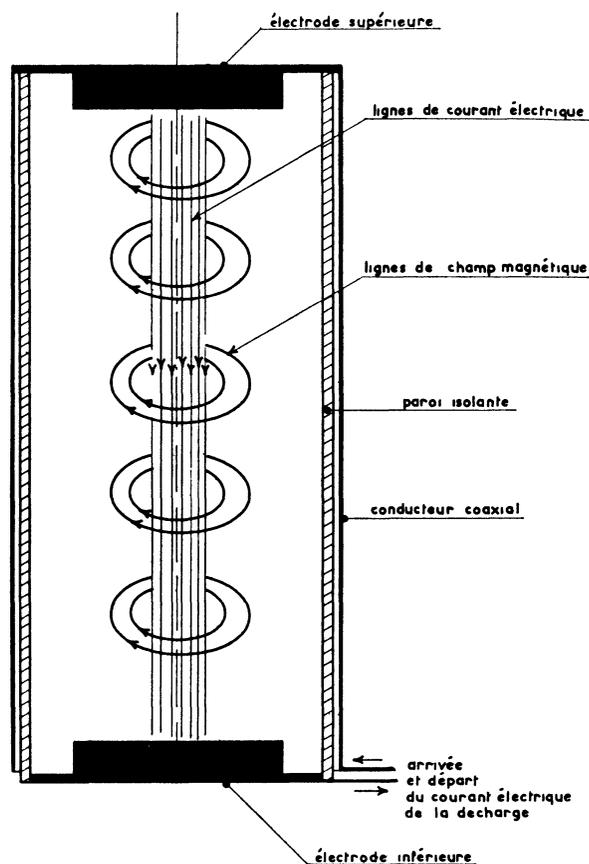


FIG. 3. — Représentation schématique d'une décharge entre électrodes contractée sur l'axe de la chambre par le phénomène de striction.

cas type 200 000 ampères — la force ainsi exercée est suffisante pour comprimer le gaz et le rassembler dans une colonne axiale, isolée des parois de la chambre. Nous avons donc là un moyen de chauffer le plasma, tant par l'effet de compression que par l'effet Joule et de l'enfermer dans un corset de lignes de forces magnétiques circulaires, perpendiculairement à l'axe.

Les premières déclarations relatives à l'application de ces décharges à forte intensité entre électrodes aux recherches sur la fusion furent faites en mai 1956 par l'Académicien soviétique Kurchatov. Elles eurent un grand retentissement et furent suivies par la publication de travaux analogues entrepris dans divers pays, notamment aux U. S. A., en France, en Angleterre, en Suède, etc...

Les températures atteintes au cours de telles décharges dans du deutérium ne semblent pas avoir dépassé notablement 100 000 °C, pendant des

durées de l'ordre de la microseconde. Quant aux neutrons qui sont observés au moment où la colonne est la plus resserrée, il est maintenant établi, à la suite de très concluantes expériences américaines, qu'ils ne sont pas d'origine thermonucléaire mais que les réactions de fusion aux-

quelles ils doivent leur origine sont provoquées par des deutons accélérés parallèlement à l'axe de la décharge dans des champs électriques intenses qui se forment localement et de façon fugitive, dans les replis de la colonne du plasma.

Si de telles décharges sont fort intéressantes

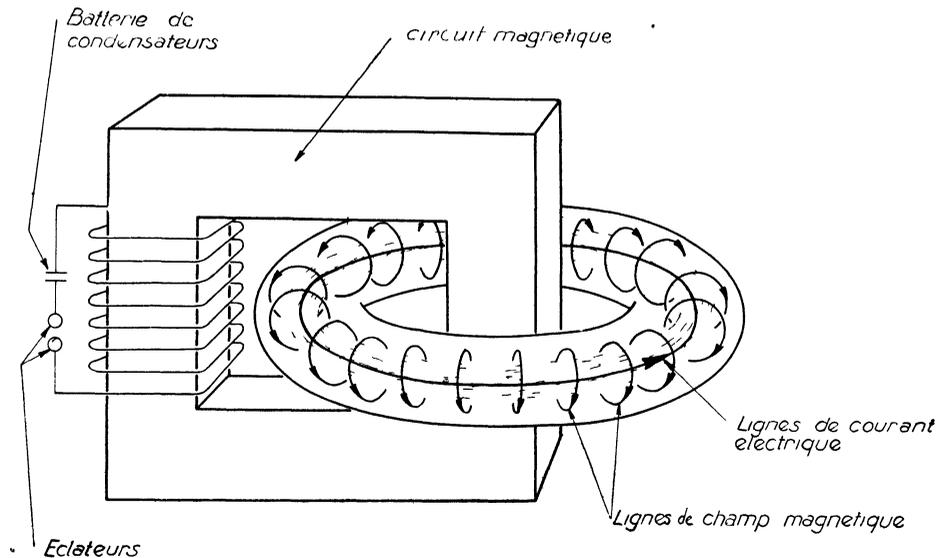


FIG. 4. — Principe de la décharge annulaire, sans électrodes.

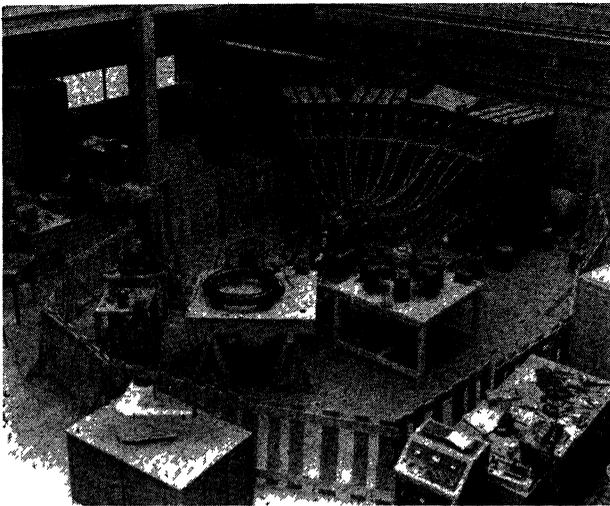


FIG. 5. — Dispositif de décharges toroidales installé au Centre d'Études Nucleaires de Fontenay-aux-Roses. Le tore en cours d'essai est en verre et comporte une enveloppe extérieure en cuivre sur laquelle sont bobinés les circuits inducteur et stabilisateur.

On distingue des enroulements destinés à la mesure de l'intensité du courant dans la décharge. Sur la droite, un tore de démonstration en verre, pourvu de huit noyaux magnétiques.

comme moyen d'investigation, elles ne semblent à aucun titre pouvoir constituer l'amorce d'un réac-

teur à fusion, la présence des électrodes empêchant l'isolement complet du plasma.

Aussi depuis plusieurs années, et d'abord en Angleterre et aux États-Unis, des recherches ont-elles été entreprises vers la réalisation de décharges gazeuses annulaires, refermées sur elles-mêmes, sans électrodes. Les nombreux dispositifs construits à cette fin fonctionnent comme de véritables transformateurs dont le secondaire est fait d'une spire unique : l'anneau de plasma maintenant complètement isolé dans l'espace (cf. fig. 4).

Les travaux entrepris sur ces décharges droites ou toroïdales mirent très vite en évidence un phénomène très désagréable. Si aucun dispositif n'est prévu pour y parer, la colonne de plasma se tord, se disloque, se fragmente en un temps très court qui peut être de l'ordre de la microseconde et vient frapper les parois, mettant ainsi fin à l'entreprise.

Parmi les divers procédés proposés pour remédier à cet état de chose, les deux principaux sont l'emploi d'un champ magnétique longitudinal créé à l'intérieur de la colonne de la décharge par des bobinages extérieurs et l'emploi d'une enveloppe conductrice qui entoure le tube à décharge, et agit grâce aux courants induits qui y sont le siège lorsque la colonne de plasma se déforme et se déplace à son intérieur. Le champ magnétique axial est surtout efficace contre les déformations dont l'échelle de longueur, parallèlement à l'axe, est petite vis-à-vis du diamètre de la colonne ;

l'effet de l'enveloppe conductrice est, par contre, d'autant meilleur que cette échelle de longueur est plus grande vis-à-vis du diamètre intérieur de l'enveloppe. On peut donc espérer, par une combinaison des deux, tendre à une stabilisation complète de la colonne, la question étant plutôt de savoir si les conditions assurant cette stabilisation peuvent être maintenues pendant les durées de plusieurs secondes requises pour le fonctionnement d'un engin thermonucléaire à fusion.

La manière pratique de lutter victorieusement contre l'instabilité foncière de la colonne de la décharge, tout en assurant le chauffage du plasma, constitue l'objectif principal des appareils récem-



FIG. 6. — Dispositif de décharges toroidales installé par le C. E. A. au Centre d'Essais de l'Électricité de France à Fontenay-aux-Roses. Le tore essayé ici est en aluminium; on distingue sur la photographie les éléments du circuit magnétique améliorant le couplage entre le circuit inducteur et la décharge, les bobines créant le champ magnétique stabilisateur et divers appareils (poste HF pour la préionisation du gaz, spectrographe optique, appareil de cinématographie ultra-rapide, etc...).

ments décrits tels que le Perhapsatron S3 de Los Alamos ou la machine Zeta de Harwell. Les figures 5 et 6 reproduisent la photographie de deux montages de décharges toroidales, actuellement essayés par le Commissariat à l'Énergie Atomique. Tous ces appareils sont essentiellement des outils expérimentaux et sont à coups sûr aussi éloignés des réacteurs thermonucléaires de l'avenir que les premières machines à vapeur le sont des turbines modernes. Il n'est pas cependant exclu qu'ils contiennent dès maintenant, même dans un état embryonnaire, l'essentiel des dispositifs qui permettront plus tard de faire fonctionner des engins industriels.

Visions d'avenir. — Toute extrapolation ne peut aujourd'hui comporter qu'une grande part de fan-

taisie. Si, cependant, nous essayons d'imaginer ce que pourrait être un réacteur thermonucléaire utilisant le principe de la striction — en admettant que l'instabilité de ce phénomène ne constitue pas un obstacle insurmontable — qu'entrevoions nous ?

Nous imaginons un tore de grande dimensions, imposées plus encore par des considérations technologiques que pour des raisons à caractère fondamental. Son petit diamètre serait au minimum de l'ordre du mètre, son grand diamètre supérieur à 10 mètres. Le récipient pourrait être constitué d'une épaisse enveloppe en aluminium dont on aurait rendu la paroi interne isolante en formant par exemple une couche superficielle d'alumine. Autour seraient disposés les bobinages créant le champ longitudinal stabilisateur et le circuit magnétique assurant le couplage entre les circuits inducteurs et la décharge. Nous pouvons par exemple envisager un fonctionnement cyclique, en renouvelant à chaque cycle la charge de deutérium introduit dans l'appareil. Dans un premier temps, pendant lequel le gaz est ionisé et porté à plus de 500 millions de degrés, une puissance électrique de 1 000 MW est nécessaire, pendant une durée de l'ordre de la seconde, pour chauffer un plasma et remplir l'espace avec les champs magnétiques assurant le confinement stable. Le chauffage s'effectuerait d'abord par effet Joule, puis au moyen d'une série de compressions exercées sur le plasma en pulsant le courant inducteur ou le courant créant le champ stabilisateur. Pendant le temps suivant, qui doit durer plus d'une dizaine de secondes, un courant de l'ordre de 10 millions d'ampères se maintient dans le plasma très conducteur, tandis que les réactions de fusion y dégagent une puissance de l'ordre de 300 MW.

La possibilité a été mentionnée à diverses reprises qu'un réacteur à fusion permette la production directe d'électricité, sans passer par l'intermédiaire de la chaleur. Le schéma auquel on songe à ce propos est le suivant : lorsque des réactions de fusion se développent dans le plasma, il s'échauffe, sa pression augmente, il tend donc à distendre le corset de champ magnétique qui l'enserme et cette action contre les forces électro-dynamiques va se traduire par l'apparition dans des bobinages extérieurs de courants induits. Il faut cependant bien insister sur le caractère nécessairement très vague de tels schémas, qui ne constituent à l'heure actuelle qu'une perspective séduisante. Dans tous les cas il est bien clair qu'une part très notable de l'énergie produite sera inégalement convertie dans les régions extérieures de l'appareil en chaleur à basse température, soit par conduction du plasma à la paroi, soit par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique et des neutrons s'échappant du milieu réactionnel.

A puissance produite égale, les neutrons issus d'un réacteur à fusion au deutérium seront

plusieurs dizaines de fois plus abondants que ceux qui sont émis par le cœur d'une pile atomique à fission de l'uranium. Ils devront eux aussi être absorbés dans un épais blindage extérieur, où ils pourront être utilisés pour régénérer par exemple du tritium à partir de lithium 6. L'existence d'un rayonnement aussi intense posera à coup sûr de graves problèmes pour le fonctionnement et l'entretien de l'appareillage entourant l'enceinte où s'opèrent les réactions de fusion. S'il est vrai que les produits directs de ces réactions sont incomparablement moins actifs que les produits de fission de l'uranium, on constate cependant que les réacteurs à fusion ne seront pas exempts des problèmes techniques posés par la radio-activité.

On peut, par contre, être tout à fait tranquille en ce qui concerne les risques présentés par le fonctionnement d'un réacteur thermonucléaire. Il n'existe en effet aucune façon qu'un tel réacteur puisse s'emballer dangereusement ou donner lieu à

quoi que ce soit ressemblant à une explosion nucléaire.

Les considérations qui précèdent ont, je pense, suffisamment mis en évidence les énormes difficultés que soulève la mise au point d'un réacteur thermonucléaire viable et la distance qu'il nous reste à parcourir pour y parvenir. Aussi à la question : « La fusion industrielle est-elle pour demain ? » devons-nous répondre : Non, en tout cas pas pour demain matin. Cependant, le fait qu'aucune impossibilité fondamentale n'ait été reconnue et l'ampleur des moyens qui seront sans nul doute consacrés à une entreprise dont l'enjeu est aussi important doivent nous inciter à l'optimisme. Aussi voudrais-je en concluant exprimer la conviction que la fusion industrielle sera la réalité d'après-demain, et si ce ne doit être que la semaine prochaine je ne pense pas que nos petits-enfants puissent nous en vouloir.

Manuscrit reçu le 3 juin 1958.