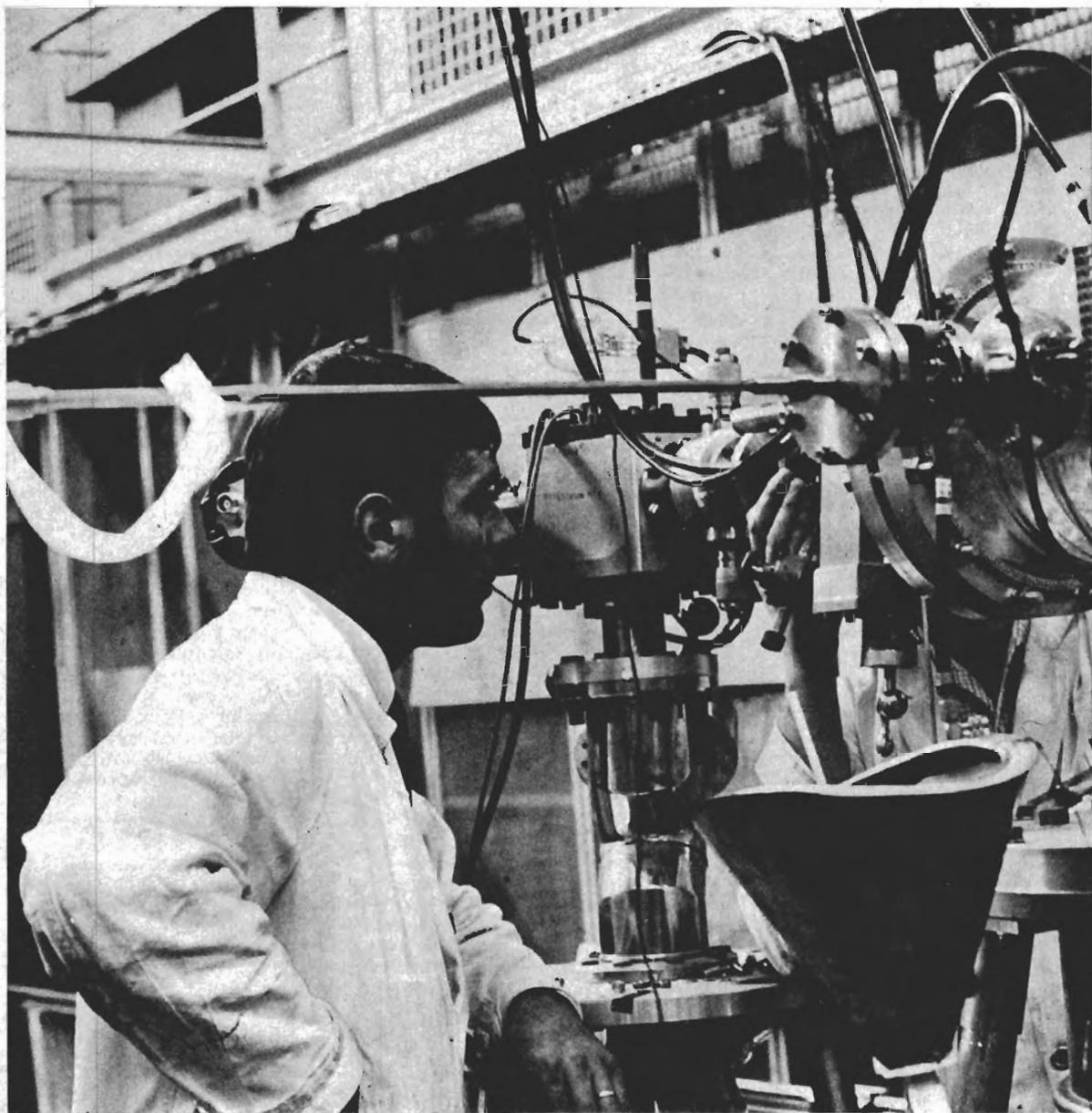


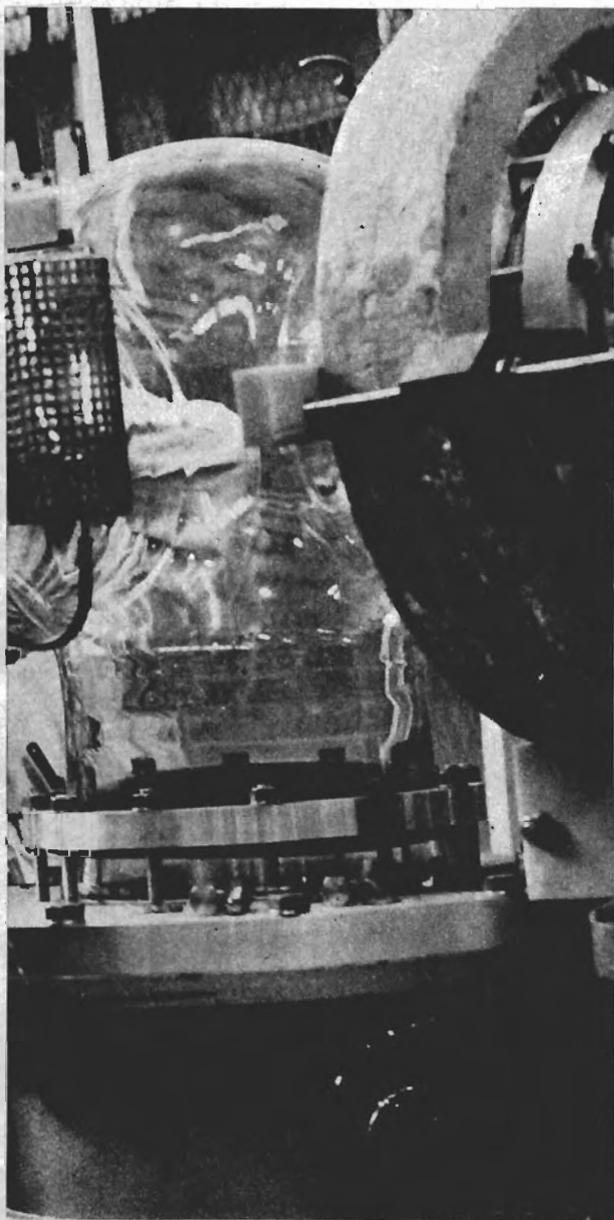
A quand l'énergie de fusion ?

LES PHYSICIENS DE FONTENAY METTENT EN "LÉVITATION" LE QUATRIÈME ÉTAT DE LA MATIÈRE



Dans cet appareillage étrange, l'énergie des étoiles mise en bouteille.

Contrôler et domestiquer la fusion atomique demeure encore aujourd'hui le grand rêve de l'humanité : l'énergie promise serait pratiquement inépuisable. Après les premières désillusions, voici les raisons d'espérer.



Il y a quinze ans, l'écrasante lueur de la bombe H rendait à jamais célèbre le minuscule atoll d'Eniwetok et ouvrait un espoir presque insensé dans le monde savant : une fois contrôlée, la fusion des atomes d'hydrogène serait capable d'assurer pour l'éternité toute l'énergie dont la Terre a besoin. Rêve immense, où tout devenait possible : irriguer le Sahara, cultiver des orangers en Terre Adélie, installer des villes dans les déserts ou même transformer la mer en eau douce ; un vrai jardin des Hespérides. Oh, bien sûr, il n'était pas pour demain. Les physiciens les plus optimistes demandaient une dizaine d'années, les autres au plus une vingtaine. De toute manière, la fusion représentait l'espoir ultime pour une humanité sans cesse plus nombreuse puisque charbon, pétrole et même uranium sont menacés d'épuisement à court terme. Partout, en Amérique, en France, en Russie, en Angleterre, des laboratoires se montaient et la fugitive clarté des plasmas incarnait l'aube d'une civilisation nouvelle.

Aujourd'hui, nous avons largement parcouru le délai que réclamaient les chercheurs optimistes, et faire le point des études en cours devenait nécessaire. Le plus simple étant d'aller aux sources, nous avons sollicité le Commissariat à l'Energie Atomique, auquel est rattachée la section fusion nucléaire. Notre demande est tombée dans une atmosphère d'étonnement général : la fusion ? Tiens, quelle idée ! Un peu plus, on nous poussait discrètement vers des réalisations plus concrètes, genre centrales atomiques classiques. Il y a deux ans à peine, l'optimisme était encore général, et nous ne nous attendions guère à cette chute. « La fusion n'a pas le vent en poupe... » On nous l'a dit et redit tout au long de notre enquête, au point de susciter dans notre esprit l'image d'une goélette montée par un équipage de physiciens en col marin et pompon rouge, voguant en marche arrière sous un fort vent contraire.

Faut-il attendre que le vent tourne ? Les chercheurs eux-mêmes prétendent qu'on risque d'attendre longtemps. Et pourtant, à Fontenay-aux-Roses, nous avons vu d'extraordinaires machines qui encerclent les plasmas dans des champs magnétiques titanesques et les montent à des dizaines de mil-

lions de degrés. Le plus puissant de ces générateurs de plasma est encore en cours de montage, et c'est peut-être lui qui demain réalisera la première fusion contrôlée. Un désaccord apparaît donc entre les déclarations des chercheurs et les réalisations techniques déjà obtenues ; faut-il l'attribuer à un pessimisme de commande, ou à cette réserve que les scientifiques gardent toujours quant à l'avenir de leurs découvertes ? Sans doute aux deux.

La fusion étant encore à l'heure actuelle plus un processus de recherche fondamentale qu'une étape technologique ou industrielle, la plupart des physiciens, en toute honnêteté, ne peuvent se prononcer de manière décisive. De plus, ils gardent en mémoire le cas du Pr. Cockroft, directeur des services anglais à Abingdon, qui publia un peu prématurément un bulletin de victoire retentissant. La désillusion fut à la mesure de l'enthousiasme...

D'un autre côté, la fusion une fois réalisée déclassera quasiment du jour au lendemain toutes les centrales atomiques classiques, pour ne pas citer le charbon ou le pétrole. De ce fait, si on déclare que la fusion est pour demain, il devient fort difficile de justifier les immenses crédits alloués aux recherches atomiques habituelles, c'est-à-dire les piles, les bombes, les usines de séparation isotopique et autres. Le problème n'est d'ailleurs pas particulier à la France : aux U.S.A., par exemple, le gros effort financier date de 1960 ; ensuite, pendant cinq ans, le budget fusion restait à peu près constant. En 1965, un nouveau plan fut mis à l'étude, les recherches étant supervisées par un groupe de physiciens choisis dans différentes branches des sciences nucléaires. Mais il a été jusqu'ici impossible de distribuer les

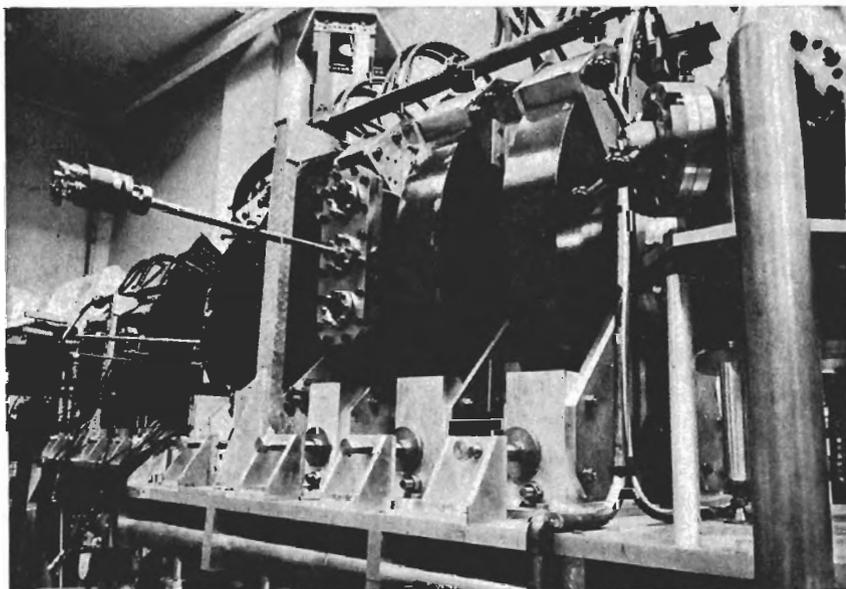
sommes réellement prévues par le plan, tant la guerre du Vietnam a serré les budgets alloués aux sciences fondamentales.

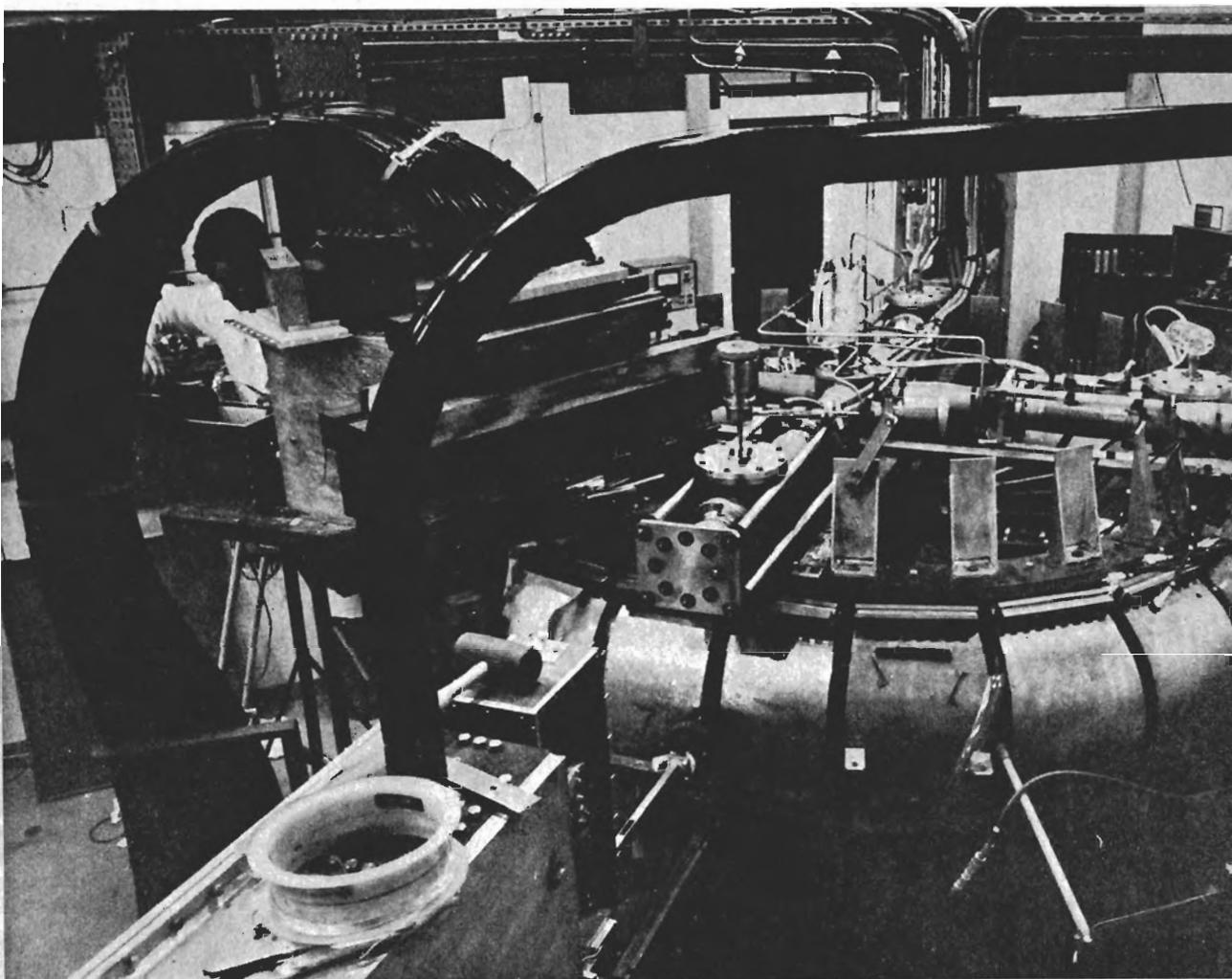
Seule, semble-t-il, l'URSS continue à donner la primeur aux études touchant la fusion, et la plupart des découvertes ou améliorations concernant les plasmas sont d'origine soviétique. Il faut dire que la Russie a engagé dans ces recherches un nombre de chercheurs très supérieur à celui qu'alignent les Américains, et qui plus est le niveau scientifique de ces chercheurs est de tout premier plan, à croire que les Soviétiques ont mis leurs meilleurs éléments sur la fusion.

La fission nucléaire : un pis-aller

Le fait n'aurait rien de surprenant, car si vraiment un jour la fusion tombe à l'eau, le plus grand rêve de l'humanité s'écroule : les réactions thermonucléaires apparaissent aujourd'hui comme les seules capables de fournir une énergie inépuisable à partir d'un combustible lui aussi inépuisable : l'hydrogène, c'est-à-dire l'eau. Les réactions de fission, celles mises en jeu dans les générateurs atomiques habituels, consomment de l'uranium, et ce métal n'est pas intarissable. Même avec les surgénérateurs, dont la réalisation est loin d'être avancée, le problème reste entier, en ce sens que l'énergie est toujours chère et limitée, à l'image des moteurs thermiques ordinaires. Qui plus est, la fission est tributaire des mines d'uranium, des usines de séparation, fragiles et terriblement coûteuses, des piles immenses, et surtout des problèmes de radioactivité. De la mine à la centrale, tout doit être blindé, protégé, surveillé, contrôlé et isolé ; ingénieurs et techniciens portent constamment des films de contrôle du rayonnement, des vêtements protecteurs ou

Un générateur à plasma du type bouteille ouverte. Le plasma lui-même prend naissance à l'extrémité gauche de l'instrument, puisqu'il est accéléré et purifié jusqu'au moment où il atteint l'espace compris entre les deux grosses bobines de droite.





En enceinte fermée, le plasma décrit une trajectoire en forme de 8 aplati.

des compteurs de Geiger. Les déchets radioactifs posent d'insurmontables problèmes et, l'un dans l'autre, la fission est toujours un processus toxique à grande échelle. Enfin, un rigoureux contrôle militaire et policier pèse toujours sur tout ce qui concerne la fission, avec une tendance larvée à l'espionnage et au secret.

Inversement, nous avons pu traverser toutes les salles d'essai de Fontenay, alors que certains générateurs de plasma étaient en cours de fonctionnement, sans autre précaution spéciale que d'éviter les câbles électriques ; pas de déchets radioactifs, pas d'isotopes vénéneux, pas de risques de fuite ou de contamination : la fusion est une opération aussi propre que la décharge électrique des tubes fluorescents. Mieux encore, aucun regard militaire ou policier ne vient troubler les recherches ; alors que la fusion avait démarré dans une atmosphère de suspicion, de

mystère et de guerre froide, le Pr. Kourchatov, de l'Académie des Sciences Soviétiques, se permettait, en 1956, de livrer tous les résultats de ses recherches devant une conférence internationale. Depuis ce jour, la fusion nucléaire est débarrassée de tous les agents spéciaux chargés d'en garder le secret et les études se font absolument au grand jour, sans aucune restriction : un chercheur américain sera reçu demain en URSS ou en France, on lui montrera tous les dispositifs et on lui soumettra les problèmes qui se posent. De même, un Français sera le bienvenu en Angleterre ou en Russie, et inversement de toutes les manières possibles. Toutes les recettes et les découvertes sont échangées d'un pays à l'autre, et la fusion est avec l'astronomie l'un des rares domaines de recherche qui se fasse en commun à travers le monde entier.

Le fait s'explique pour deux raisons : pri-

mo, la fusion est une science qui, Dieu merci, ne peut en aucun cas intéresser les militaires, et d'autre part, les problèmes soulevés sont si ardues que la coopération internationale est en fait absolument nécessaire. On sait que la fantastique énergie de liaison des particules constituant le noyau atomique peut être extraite de la matière de deux façons opposées : par fission d'un noyau lourd formé d'un grand nombre de particules, qui se brise alors en deux noyaux plus petits ; à ce moment, la somme des masses des deux petits noyaux est inférieure à la masse du gros noyau de départ, la différence étant convertie en énergie suivant la formule d'Einstein $W = mc^2$. Ou, inversement, par fusion de deux noyaux légers, donc constitués d'un petit nombre de particules ; la masse du noyau résultant est inférieure à la somme des masses des deux noyaux, la différence étant toujours convertie en énergie. La fission correspond au processus des piles et bombes atomiques classiques, le matériau de départ étant généralement l'uranium ou le plutonium dont les noyaux très lourds comprennent en moyenne 235 particules. Le processus n'est pas très difficile à déclencher puisque la réaction se poursuit dès qu'un volume suffisant de combustible est réuni.

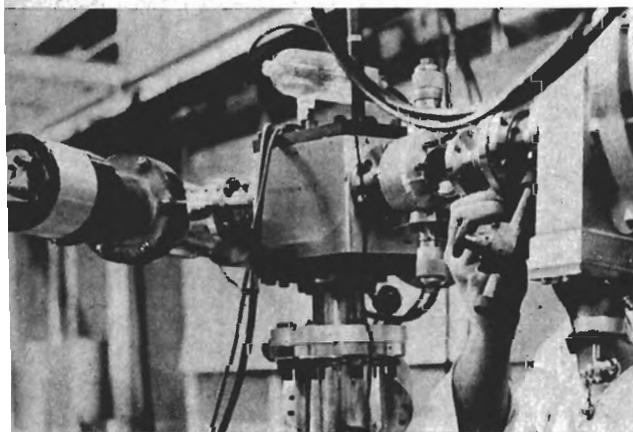
La fusion part de gaz légers, tels l'hydrogène ou le deutérium, dont le noyau comprend respectivement une et deux particules. Tout le problème est d'arriver à provoquer la collision des noyaux pour les faire fusionner, car ces noyaux portent tous une charge électrique de même signe et ont tendance à se repousser. Qui plus est, dans les conditions normales de température et de pression, les noyaux sont entourés d'électrons pour constituer des atomes qui n'ont aucun goût particulier pour se tamponner les uns les autres.

On commence par séparer noyaux et électrons en portant le gaz léger à très haute température sous l'influence d'une formidable

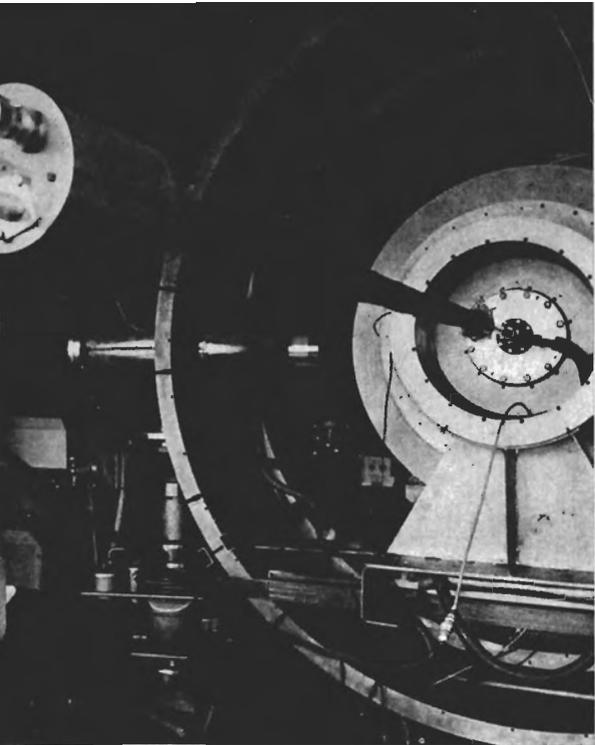
décharge électrique ; le gaz devient un plasma, c'est-à-dire un milieu ionisé où les atomes ont perdu leurs couches d'électrons, et où se promènent librement les noyaux positifs, et les électrons négatifs. Le terme de plasma lui-même fut créé dans les années 30 par le physicien Langmuir, par analogie avec le cytoplasme des cellules vivantes et pour traduire le comportement fondamental d'un ensemble de particules chargées, qui est celui d'une gelée tremblotante ; une suite d'oscillations internes agite sans arrêt le plasma, car tout dérangement en un point quelconque se traduit par un défaut de charge électrique dans la région perturbée, qui lui-même s'accompagne d'un champ électrique dont la tendance est de ramener les charges de la région où elles sont en excès vers la région où elles manquent. Les charges se mettent en mouvement, dépassent sur leur lancée leur position d'équilibre, créant une nouvelle perturbation qui à son tour se propage un peu plus loin et finalement ces oscillations se transmettent à l'ensemble du plasma. Ce caractère tremblotant permet déjà de comprendre combien il est difficile de garder un plasma en équilibre.

Une cage immatérielle

Les températures nécessaires pour amorcer la fusion sont considérables, et sans rapport avec ce qu'on obtient habituellement dans les creusets. Seules sont comparables les températures à l'intérieur du Soleil ou dans les étoiles qui, précisément, tirent leur énergie de la fusion. La chaleur n'étant autre qu'une agitation des particules, et la température indiquant en fait cette vitesse d'agitation, il fait porter le gaz à une température très élevée pour que la vitesse des ions soit de taille à forcer la répulsion entre particules de même charge. On compte qu'il faut 50 millions de degrés pour le mélange deutérium-tritium, et 400 millions pour le deutérium seul. En règle générale, on table donc sur une moyenne de 100 millions de degrés ; à ce moment, les ions sont si agités qu'ils acquièrent une vitesse suffisante pour se percuter et les noyaux fusionnent entre eux. Mais pour qu'il y ait un gain d'énergie, il faut encore que les ions soient en nombre suffisant et qu'ils restent proches les uns des autres un certain temps. Si on appelle n le nombre d'ions par cm^3 et t le temps de maintien, la réaction de fusion ne commence que si le produit $n.t$ est de l'ordre de 10^{14} à 10^{15} pour une température voisine de 10^8 °C. Or, si la température de 100 millions de degrés peut être atteinte avec une décharge électrique de très forte intensité, on est loin d'obtenir un produit $n.t$ égal à 10^{14} . La meilleure valeur actuellement réalisée se situe à 10^{10} , la limite dans certains cas particuliers montant jusqu'à 10^{11} . Il s'en faut encore d'un facteur 1 000 que le résultat corresponde à la fusion vraie, et toutes les études actuellement en cours concernant des plasmas. Encore sont-elles fort ardues.



L'étude finale du plasma portée à très haute température se fait dans cet analyseur où est maintenu un vide très poussé.



Une sonde de longueur réglable pour le contrôle des gaz ionisés. Les gros anneaux au premier plan contrebalancent le magnétisme terrestre.

C'est que la fusion, simple en théorie, est barrée dans la pratique par les lois de la thermodynamique, ou plus simplement de l'équilibre. Tout d'abord, les températures nécessaires sont bien trop élevées pour qu'il soit question de maintenir le plasma dans un récipient quelconque : n'oublions pas que passés 3 400° C, tous les métaux sont déjà à l'état liquide, et qu'au delà de 10 000° C il n'existe plus d'état solide. Or, les températures de plasma se situent dans les centaines de millions de degrés, et de toute manière, le moindre contact, aussi léger soit-il, avec un récipient quelconque, abaisserait la température et le plasma retomberait à l'état gazeux ordinaire.

La seule solution consiste à maintenir le plasma pour ainsi dire en lévitation : invisibles et immatérielles, les lignes de force d'un champ magnétique constituent une sorte de cage qui maintient les ions serrés les uns contre les autres. Plus exactement, noyaux positifs et électrons négatifs se mettent à tourner autour des lignes de force du champ. L'ennui est que le phénomène ne dure pas : maintenir le plasma dans ce grillage magnétique revient à vouloir enfermer une fourmière dans une cage à moineaux ; il faudrait des milliers de doigts pour repousser toutes les fourmis qui passent à travers les barreaux, et plus elles sont nombreuses, plus le problème paraît insoluble.

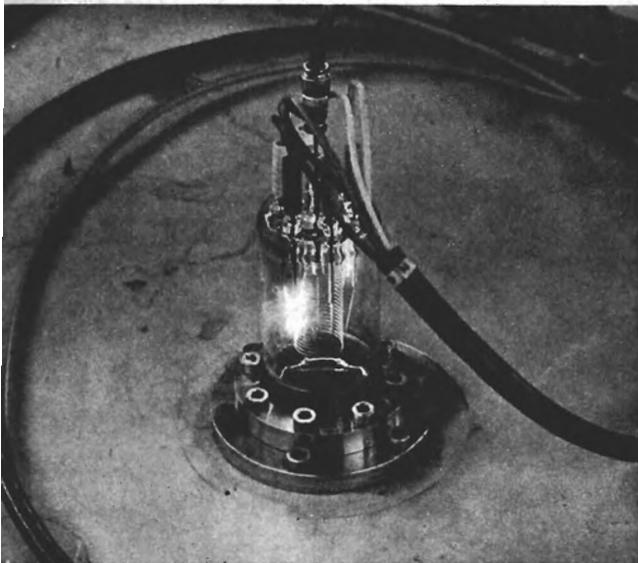
Ceci explique que si on peut garder confiné pendant 1 1/2 mn (100 s) un plasma dont

la densité est de 10^8 ions par centimètre cube, on ne dépasse pas un cent-millième de seconde (10^{-5}) à la densité de 10^{15} , et un dix-millionième (10^{-7}) à la densité de 10^{17} . On notera que le produit de t par n donne toujours 10^{10} , valeur dix mille fois inférieure aux 10^{14} dont nous avons signalé qu'ils constituaient la première approche de la fusion vraie. Cette instabilité de la mèche de plasma se comprend aisément si l'on réalise qu'il faut fabriquer un milieu continu dont la température centrale est très élevée alors que la température le long des parois est faible, et dont la pression au centre est des milliers de fois supérieure à celle qui règne au bord. Quelles que soient la forme et l'intensité du champ magnétique, l'équilibre tend à se rétablir spontanément.

On a créé toutes sortes de cages magnétiques qui peuvent se classer en deux catégories, les ouvertes et les fermées. Les premières bouteilles magnétiques appartenaient à la classe ouverte : deux électro-aimants placés à chaque extrémité de la mèche de plasma permettent de serrer les lignes de force et les ions rebondissent d'une extrémité à l'autre. Dans les cages fermées, le plasma a la forme d'un anneau aplati comme un 8 et le champ magnétique est toroïdal. Nous n'entrerons pas dans le détail de ces cages magnétiques qui relèvent de la topologie et de la géométrie différentielle pour la conception, du magnétisme et de l'électrodynamique pour la réalisation. Disons seulement que le mouvement des particules chargées engendre son propre champ magnétique qui réagit avec celui des électro-aimants, et ces interactions sont d'expression mathématique si compliquée qu'elles ont fini par être imprévisibles.

C'est donc sur le confinement du plasma qu'achoppe actuellement toute recherche concernant la fusion ; chaque fois qu'un physicien réussit à neutraliser une instabilité, une autre surgit ; celle-ci en cache à son tour une troisième, et ainsi de suite. Le gros problème est évidemment celui de la température : la mèche de plasma doit être maintenue écartée des parois par le champ magnétique sous peine de voir l'agitation des ions se ralentir, et pendant ce temps, la pression au centre de la mèche tend justement à repousser le plasma vers les bords.

On réussit bien à obtenir des champs magnétiques de l'ordre de 50 000 gauss, mais cette valeur est encore insuffisante pour neutraliser toutes les instabilités. Or, la consommation électrique des bobines atteint déjà 2 000 kW en deux secondes, intensité qu'il n'est pas question de maintenir plus longtemps sous peine de voir les électro-aimants se volatiliser par effet Joule ; à cela s'ajoutent les contraintes mécaniques engendrées par des champs magnétiques aussi puissants, contraintes qui sont de l'ordre de plusieurs tonnes. Heureusement en refroidissant les bobines à des températures voisines du zéro absolu, on profite de la supraconductivité (abaissement de la résistance, donc de l'échauffement par effet Joule et de la con-



Le vide très poussé qui règne dans les enceintes où se forment les plasmas nécessite un système de mesure original par évaporation d'un filament chauffé.

sommation) et on pense atteindre des champs de 150 000 à 300 000 gauss.

Il est possible d'obtenir des valeurs plus élevées encore avec de la dynamite lorsqu'il s'agit de faire une étude de plasma très brève. Non pas que la dynamite soit aimantée par elle-même, mais en entourant toute la bobine de l'électro-aimant avec un explosif très puissant, et en déclenchant la détonation au moment où le courant circule dans les spires, on réalise par focalisation circulaire de l'onde explosive une implosion de la bobine qui se trouve formidablement contractée en une fraction de seconde. L'intensité du champ étant fonction inverse du diamètre des spires, les valeurs atteintes sont exceptionnelles. Les mesures doivent se faire presque instantanément car, finalement, l'explosion réduit tout en miettes et l'expérience est assez coûteuse.

C'est donc le confinement du plasma dans une cage magnétique immatérielle qui constitue la plus grosse entrave à la fusion contrôlée. Il est vraisemblable que le problème sera tôt ou tard résolu et que les physiciens pourront assurer la stabilité du plasma. Nous avons surtout insisté sur le confinement, car la fabrication d'un plasma à très haute température ne se heurte pas à de très grosses difficultés. La première solution a consisté à enfermer de l'hydrogène ou du deutérium sous faible pression dans une ampoule, et à faire passer une très forte décharge électrique dans le tube. Les condensateurs capables d'emmagasiner des charges électriques formidables existent aujourd'hui couramment ; évidemment, ils claquent de temps en temps avec une forte détonation, mais les chercheurs

portent des casques antibruit du même type que ceux qu'on voit dans les stands sur la tête des tireurs au revolver ou au fusil de gros calibre, et l'inconvénient est tout à fait mineur.

D'autre part, on peut faire passer directement le gaz léger enfermé dans le verre sous la forme de plasma en le soumettant à des courants de haute fréquence ou aux ondes concentrées d'un laser. A cela s'ajoutent les canons à plasma, où la bouffée de gaz brûlants est accélérée pour la débarrasser des impuretés qui restent en rade le long du trajet. De même, on peut faire tourner le plasma dans une enceinte circulaire et s'arranger pour que les traces de gaz impur dérapent dans les virages et disparaissent de la route. La pureté du plasma est en effet essentielle à la réussite de la fusion.

Un dernier problème se pose maintenant : à supposer que la fusion soit réalisée, comment utiliserait-on l'énergie libérée ? Avec une machine à vapeur, comme toujours ! La fusion de l'hydrogène libérera une formidable quantité de rayonnements : rayons α , rayons γ , neutrons rapides, etc. L'énergie de ces rayons se transforme en chaleur lorsqu'ils sont absorbés par un fluide, et ce fluide échauffé servira de source chaude pour une machine thermique avec turbines à vapeur et alternateurs. La conversion ne posera donc que des problèmes technologiques facilement solubles.

Une science nécessaire

Mais, en attendant ce jour heureux, il faut tout de même considérer que les recherches concernant la fusion conduisent déjà à des applications du plus grand intérêt technique : l'étude des plasmas mène par exemple à la magnéto-hydrodynamique, dont le rendement avoisine maintenant 50 % et qui permettra de s'affranchir des turbines à vapeur habituelles. L'optique, le laser, la supraconductivité, autant de disciplines scientifiques qui profitent directement des études menées à Fontenay-aux-Roses.

D'autre part, le plasma, également désigné sous le terme de quatrième état de la matière, est un milieu physique encore mal connu, mais très important puisqu'il représente les neuf dixièmes de l'univers sous la forme d'étoiles ; son étude est donc essentielle en tant que science fondamentale. D'un point de vue philosophique, pourrait-on dire, la connaissance d'un phénomène universellement présent dans l'espace le plus distant est aussi nécessaire à l'homme que toute autre forme de recherche : astronomie, géologie, biologie, et autres. La découverte de la radioactivité par Becquerel, considérée à l'origine comme une curiosité de laboratoire, a mené à la science atomique dont les applications sont chaque jour plus utiles à la civilisation. Tout permet de penser que l'étude des plasmas conduira de même à une science nouvelle tout aussi importante pour l'humanité.

Renaud de la TAILLE