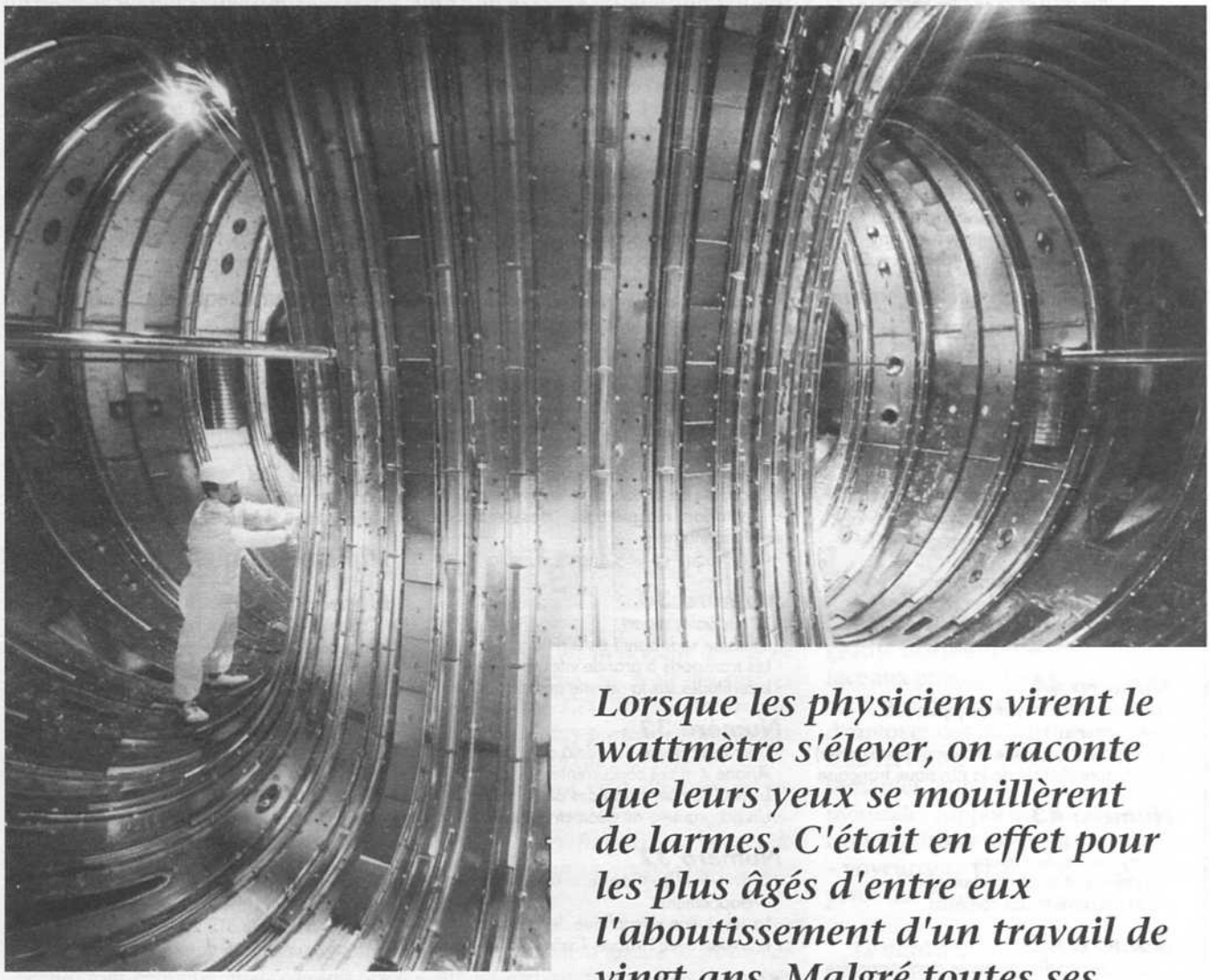
Fusion thermonucléaire : un nouveau record !



Lorsque les physiciens virent le wattmètre s'élever, on raconte que leurs yeux se mouillèrent de larmes. C'était en effet pour les plus âgés d'entre eux l'aboutissement d'un travail de vingt ans. Malgré toutes ses limites, il faut se réjouir du succès du TFTR de Princeton. Il ouvre en effet des perspectives nouvelles et renforce ceux qui affirment qu'il n'y a pas de limites à la créativité humaine.

Mark Wilsey

Les physiciens du laboratoire de Physique des plasmas de Princeton, situé dans l'Etat américain du New Jersey, ont réussi, le 9 décembre dernier, à produire 3 mégawatts (MW) d'énergie de fusion thermonucléaire, battant ainsi le record mondial en la matière. La puissance a été produite par une impulsion qui a duré environ une seconde. Le jour suivant, le record était porté à 6 MW ; il était détenu jusqu'ici par l'équipe européenne du JET (Joint European Torus), qui avait produit 1,7 MW en décembre 1991. Il s'agit de l'une des voies principales envisagées pour obtenir la fusion. Le Tokamak est un acronyme pour les mots « Chambre magnétique toroïdale », en russe. C'est en effet une idée qui vient d'Andreï Sakharov et de ses collaborateurs. Les Tokamaks sont de grandes machines en forme de tore permettant de confiner, par voie de champs magnétiques, un plasma chaud et dense dans lequel les réactions de fusion peuvent se dérouler. Celles-ci consistent à fusionner ensemble deux atomes d'hydrogène (ou leurs isotopes, le deutérium et le tritium) ; cette fusion aboutit à la formation d'hélium avec un dégagement d'énergie. Le soleil et les étoiles tirent leur énergie de la fusion thermonucléaire. Etant donné que le combustible (hydrogène) est très répandu, il s'agit d'une source d'énergie quasiment illimité, qui possède en plus l'avantage d'être très propre (pas de génération de polluants atmosphériques et rares déchets nucléaires à faible durée de vie). Notre magazine tire son nom de l'espoir que l'humanité arrivera à maîtriser cette forme d'énergie.

A Princeton, on a utilisé pour la première fois un combustible constitué à parts égales de deutérium (D) et de tritium (T). Les noyaux de ces formes lourdes d'hydrogène comprennent un proton et un neutron (pour D) et un proton avec deux neutrons (dans le cas de T). Dans le cas du JET européen, le combustible utilisé avait 11% de tritium. Le TFTR a consommé 29 MW pour en produire 6. Cette consommation est essentiellement due aux faisceaux de neutres, qui servent à échauffer le plasma. La température a atteint environ 350 millions de degrés (soit 30 keV), avec des densités de pointe de $7,5.10^{13}$ cm^{-3}. Auparavant, le TFTR avait déjà, au cours d'autres expériences, atteint la température record de 400 millions de degrés (25 fois plus chaud qu'à la surface du soleil !).

Les chercheurs de Princeton prévoient de mener environ 1000 expériences d'ici au mois de septembre 1994. Ces tests devraient permettre d'atteindre une puissance maximale de 10 MW, mais surtout d'étudier le plasma dans des conditions proches de celle d'un réacteur commercial. Le travail des prochains mois sera consacré à la compréhension de la dynamique des plasmas D-T et de leur interaction avec les produits de fusion (surtout des particules alpha, c'est-à-dire des noyaux d'hélium composés de deux protons et de deux neutrons). Les chercheurs espèrent observer l'auto-échauffement du plasma par des particules alpha.

Chaque réaction de fusion D-T produit un neutron et une particule alpha. C'est le neutron qui emporte 80% de l'énergie de fusion produite et qui, dans un réacteur commercial, transmettrait cette énergie pour produire de la vapeur faisant tourner un alternateur. Le reste de l'énergie est transporté par les particules alpha ; celles-ci étant positivement chargées, elles restent piégées dans le champ magnétique et donnent cette énergie par collision au reste du plasma D-T. Le confinement des particules alpha très énergétiques est le problème clef pour la production de plasmas auto-entretenus. Les connaissances acquises sur le TFTR serviront à la conception du prochain réacteur expérimental international, l'ITER. Le TFTR est en service depuis 1983. Après avoir terminé cette série de tests, il sera mis hors service et les chercheurs de Princeton se consacreront alors à la construction du TPX, le « Tokamak Physics Experiment ». Cette machine de démonstration de nouvelle génération devrait servir à démontrer la possibilité d'exploiter un tokamak en continu. Si les fonds sont débloqués, le TPX pourrait être terminé en l'an 2000.

Ce problème du financement est d'ailleurs depuis le début un paramètre clef de la recherche sur la fusion. En effet, ces machines coûtent très cher, au moins pour ceux qui pensent à court terme. A long terme, et si l'on pense en termes de développement durable, les dépenses consenties pour effectuer les recherches sur la fusion thermonucléaire sont sans doute l'investissement le plus raisonnable que l'on puisse faire. Pourtant, essentiellement pour des raisons idéologiques, le financement de ces recherches a subi de sérieux revers depuis le début des années 80. Ainsi, les expériences réalisées avec un mélange D-T étaient originellement prévues pour se dérouler en 1986. Après que cette date ait été repoussée une première fois en 1988, de nouvelles contraintes ont forcé les responsables de l'expérience à la remettre à 1993. Ces contraintes étaient d'ordre technique (le plasma se comportait de façon beaucoup plus étrange que prévue au départ), mais aussi et surtout d'ordre financier, les subventions de l'Etat fédéral étant régulièrement revues à la baisse.

Après le drame du SSC, cette machine pour laquelle on a dépensé des millions de dollars avant de finalement décider d'abandonner le projet, il se pose une question grave à la communauté internationale : avons-nous la volonté de travailler à assurer notre avenir en investissant suffisamment de temps et d'argent dans la recherche sur la fusion ? Si oui, alors il conviendrait de ne pas mettre tous nos oeufs dans le même panier. Or, c'est exactement ce que nous sommes en train de faire, en mettant toutes les ressources internationales dans un seul projet : ITER. D'autre part, aux Etats-Unis, après un démarrage prometteur suite au choc pétrolier, et une loi très favorable au développement de la fusion (le Magnetic Fusion Energy Act de 1980 fixait à l'an 2000 la démonstration de la faisabilité de l'énergie de fusion), les choses se sont nettement dégradées. Sous l'administration Reagan, le budget et les dates cibles ont été régulièrement revues à la baisse. De 2000,

on est passé à 2010 en 1983. En 1988, alors que la loi prévoyait une dépense de 788 millions de dollars, le budget fut fixé à seulement 352 millions, moins de la moitié.

Le résultat, c'est que tout a été sacrifié au Tokamak de Princeton. Les autres programmes travaillant sur des voies de recherche plus « exotiques » ont été à peu près éteints. L'exemple le plus dramatique est celui du travail sur la fusion à miroir, effectué au laboratoire de Lawrence Livermore. Ce concept consiste à produire la fusion dans une « bouteille » magnétique, un tube de plasma dont les deux extrémités sont closes par des champs magnétiques agissant comme des miroirs pour les particules chargées. Après avoir dépensé des millions de dollars à concevoir et à construire cette machine, le budget permettant de mener les expériences a été coupé au moment même où celles-ci allaient commencer. Une vision à court terme encouragée par certains députés ultra-libéraux et ultra-écologistes pour qui la recherche sur la fusion est une « dépense inutile ».

En France, le budget consacré à la fusion se divise grossièrement en deux parties : l'une concerne la contribution française aux machines internationales (le JET européen, puis le ITER mondial) et l'autre concerne le programme de recherche mené par le Commissariat à l'énergie atomique. Ce dernier a affecté un budget de 300 millions de francs à ce programme pour l'année 1994, une stabilité en francs constants.

Une étoile plus puissante que le soleil a brillé dans le ciel du New Jersey en décembre dernier. Espérons qu'elle ne sera pas filante et qu'elle servira à renforcer la détermination de ceux qui se battent pour que l'homme, après avoir utilisé la fusion de l'hydrogène pour construire un engin de destruction massive (la bombe H), parvienne à la maîtriser au service du développement de toute la planète. On ne peut pas envisager ce dernier sans énergie. Pour fournir celle-ci de façon abondante et peu onéreuse à cinq milliards de personnes, il faudra bien davantage que l'énergie solaire. ■

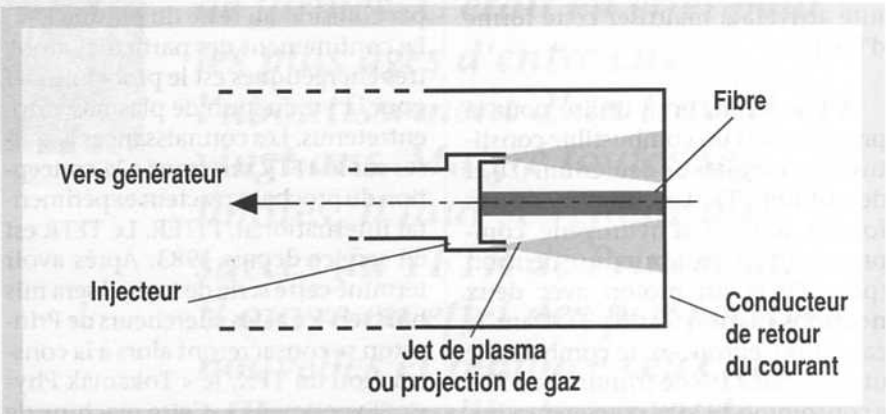
Trois nouveaux concepts à l'essai

Le département américain de l'Energie (DOE), dans le cadre d'un programme intitulé *« Innovation dans l'amélioration des tokamaks et nouveaux systèmes de confinement »*, a financé trois concepts de fusion à petite échelle. Les concepts alternatifs sont respectivement : un système à piège de Penning, des anneaux ioniques et un système à « Z-Pinch » étagé. Le bureau de l'énergie de fusion du DOE a annoncé l'été dernier que ces projets *« contribuent à élargir la vision technique du programme de fusion et pourraient mener à des réacteurs offrant des avantages en termes de taille et de simplicité sur les réacteurs à tokamak. »* Les fonds du DOE ont été mis de côté pour le projet l'an dernier, se basant sur la recommandation du Comité consultatif pour l'énergie de fusion, selon lequel *« il serait de bonne politique qu'un programme sur les concepts de fusion autres que le tokamak soit soutenu. »* Avant que le programme national américain ne soit réduit dans les années 80, plusieurs programmes prometteurs étaient sur les rails.

Les systèmes de fusion de type tokamak, qui utilisent des plasmas en forme de tore confinés par champ magnétique, sont ceux qui ont traditionnellement été le plus financés et soutenus par les fonds publics. Au fur et à mesure qu'elles se sont développées, ces machines sont devenues de plus en plus grosses et de plus en plus chères, amenant certains à se demander si la fusion ne pouvait pas être obtenue par des dispositifs plus compacts.

Le nouveau programme du DOE vise à *« fournir des tests en laboratoire de concepts scientifiquement bien fondés, à une petite échelle, du niveau de la preuve de principe. »* Les projets qui ont été sélectionnés après un appel d'offres sont : *« La fusion nucléaire dans un système Z-pinch étagé »*, conduit par Frank Wessel à l'Université Irvine de Californie ; *« anneaux ioniques pour la fusion magnétique »*, conduit par Ravi Sudan à l'Université de Cornell ; et *« Système à piège de Penning pour produire un plasma de fusion »*, conduit par Dan Barnes au

Z-Pinch étagé



Le Z-Pinch étagé utilise un plasma intermédiaire pour transférer le courant fort à une fibre de deutérium gelé, qui est alors compressée et réchauffée par le champ magnétique. Ce schéma montre la région de charge.

laboratoire de Los Alamos. Au total, le programme recevra 1,2 millions de dollars par an pendant trois ans.

Les expériences utilisant des approches de type Z-Pinch sont menées depuis déjà quelque temps. L'idée consiste à faire passer un courant à travers un plasma pour y créer un champ magnétique. Plus le courant est intense, plus le champ est fort et en conséquence plus il compresse et chauffe le plasma.

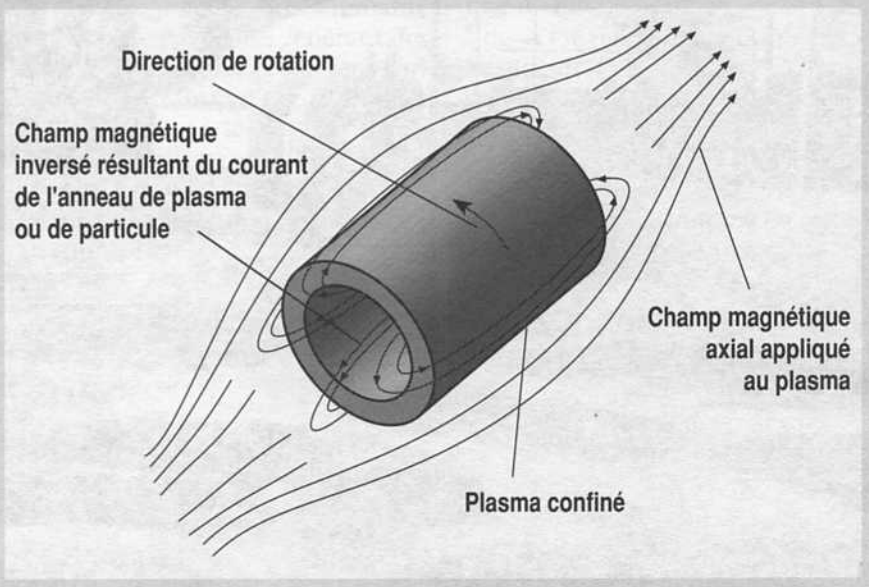
Ce que Wessel et ses collaborateurs de l'Université de Californie veulent faire consiste à tenter d'améliorer la stabilité et l'efficacité du processus. La méthode étagée utilise un plasma intermédiaire qui entoure le plasma cible. Le courant augmente d'abord dans le plasma intermédiaire et est ensuite transféré rapidement à la cible, dans ce cas une petite fibre de deutérium gelé. L'équipe de Wessel prédit que cette expérience pourrait fournir 2 méga-ampères pendant 100 nanosecondes, un gain de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux expériences précédentes.

Le projet d'anneaux ioniques de Ravi Sudan à Cornell se base sur le fait que lorsqu'un flux de particules chargées (ions) rencontre un champ magnétique, les ions sont forcés de suivre une trajectoire circulaire. En effectuant un cercle, ils génèrent à leur tour un champ magnétique qui s'oppose au champ initial. Le but de l'expérience à anneaux ioniques est de générer une configuration de champ complètement renversée, dans laquelle le plasma pourrait être confiné et chauffé dans la région à lignes de champ fermées.

Au cours de travaux précédents, le groupe de Sudan avait produit des anneaux ioniques avec des champs s'élevant à plus de dix pour cent du champ initial. Les plans actuels visent à créer des anneaux ioniques en utilisant des faisceaux de protons à fort courant et à haute énergie. La technologie permettant de produire ces faisceaux a été développée dans les années 70 à Cornell.

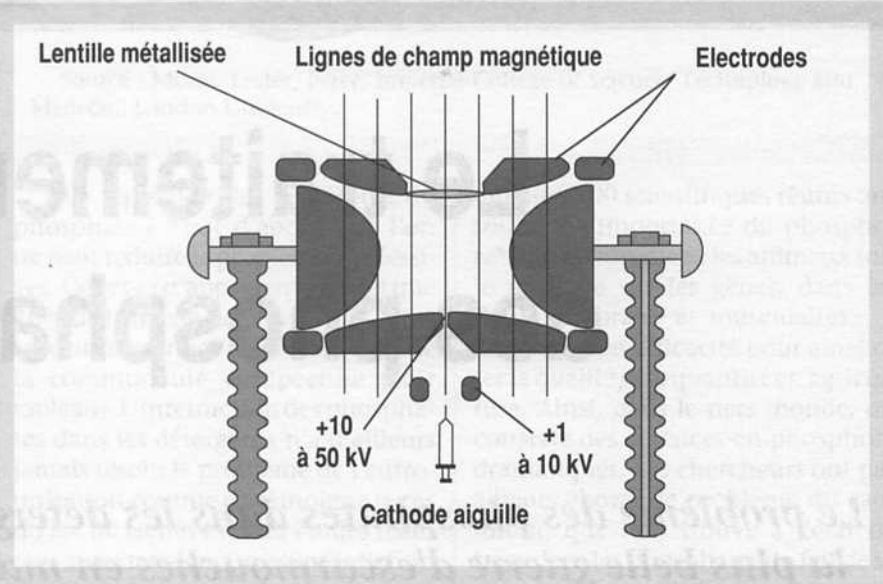
Le troisième concept innovateur fait usage du piège de Penning, qui a d'excellente propriété de confinement et a été utilisé pour étudier les électrons ainsi que pour enfermer des antiprotons. On peut penser le « piège » comme une sorte de cylindre dont le mur est un champ magnétique et dont les extrémités sont obturées par des champs électriques. A Los Alamos, Dan Barnes et son équipe utilisent un piège de Penning pour focaliser des faisceaux d'électrons sur un plasma d'électron à haute densité au centre du piège. Bien que ce travail soit réalisé avec des électrons, l'intention des chercheurs est de comprendre la physique permettant de réaliser un confinement *électrostatique* du plasma, donnant ainsi une alternative au confinement magnétique. ■

Configuration d'un anneau ionique



Des anneaux ioniques tournant dans un champ magnétique créent leur propre champ, qui, s'il est assez fort, peut confiner et chauffer le plasma.

Le piège de Penning



Le piège de Penning confine les particules chargées — dans ce cas des électrons — par une combinaison de champs électriques et magnétique.